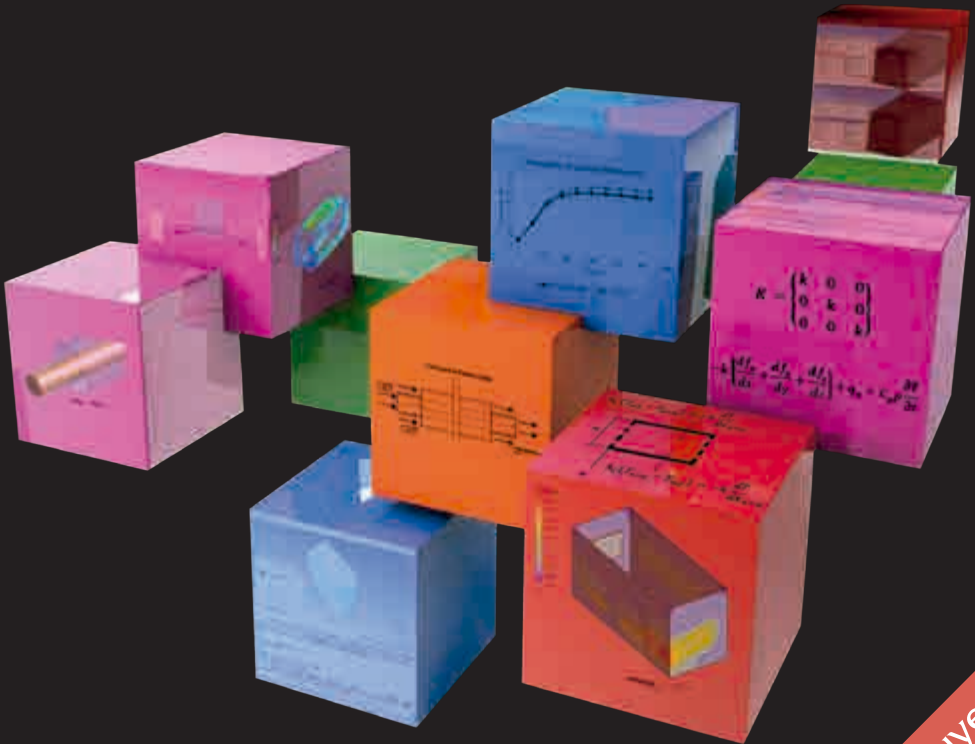


Introducción al análisis térmico y de fluidos mediante Ansys

Olena Leonidivna Naidiuk / Paúl Torres Jara



Incluye CD

Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys

Olena Leonidivna Naidiuk
Paúl Bolívar Torres

Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys



2018

Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys
Olena Leonidivna Naidiuk / Paúl Bolívar Torres

1 ra edición: Universidad Politécnica Salesiana
Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Cuenca-Ecuador
Casilla: 2074
P.B.X. (+593 7) 2050000
Fax: (+593 7) 4 088958
email: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec

Área de Ciencia y Tecnología
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Diagramación: Editorial Universitaria Abya-Yala
diseño y edición: Quito-Ecuador

Derechos de autor: 051047
Depósito legal: 005873

ISBN UPS: 978-9978-10-314-2

Impresión: Editorial Universitaria Abya-Yala
Quito-Ecuador

Impreso en Quito-Ecuador, octubre del 2018

Publicación arbitrada de la Universidad Politécnica Salesiana

Índice general

I	Conceptos básicos de termodinámica	1
1	Análisis térmico	3
1.1	Introducción al análisis térmico mediante Ansys Workbench 16.0.	3
1.1.1	Transferencia de calor	3
2	Selección de material en Ansys	14
2.1	Manejo de materiales y sus propiedades	14
2.2	Interfaz gráfico del módulo de manejo de materiales . . .	14
2.2.1	Selección del material existente en la librería . . .	17
2.2.2	Procedimiento para la creación del nuevo material	18
2.2.3	Condiciones de contorno térmicas	21
2.2.4	Problema 1: Difusión de calor	23
2.2.5	Validación de resultados	31
2.2.6	Problema 2: Incropera, ejemplo 5.7; p. 253	32
2.2.7	Comparación de resultados	42
II	Mecánica de fluidos	45
3	Mecánica de fluidos	47
3.1	Introducción a los fluidos mediante Ansys Workbench 16.0.	47
3.1.1	Clasificación de los flujos de fluidos	47
3.1.2	Ecuaciones de conservación de los fluidos	48
3.1.3	Turbulencia	48
3.1.4	Radiación	52

3.1.5	Procedimiento de análisis de problemas de dinámica de fluidos computacional (CFD)	56
3.1.6	Problema 3: Comportamiento térmico aplicando Ansys Fluent	56
3.1.7	Validación de resultados	77
3.1.8	Problema 4: Comportamiento térmico	78
3.1.9	Resultados	93
3.1.10	Problema 5: Análisis de fluidos	99
3.1.11	Resultados	142

Parte I

Conceptos básicos de termodinámica

Capítulo 1

Análisis térmico

1.1. Introducción al análisis térmico mediante Ansys Workbench 16.0.

1.1.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor es parte de la ciencia que se ocupa del análisis de la tasa de transferencia de energía que puede ocurrir entre los cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperaturas. Esta ciencia puede predecir:

- Cómo la energía calórica puede ser transferida.
- La rapidez a la que se realiza este intercambio bajo ciertas condiciones específicas.
- Las temperaturas en función del tiempo.

En el estudio de la transferencia de calor se suelen considerar tres formas distintas de transferencia: conducción, convección y radiación (Figura 1.1). En realidad, la distribución de temperatura en un medio se controla por los efectos combinados de estas tres formas de transferencia de calor, sin embargo, para simplificar los análisis se puede considerar solamente una de ellas cuando las otras son despreciables.

1.1.1.1. Transferencia de calor por conducción [1],[5]

La transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquiera de los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. La conducción es la forma de transferencia de calor en la cual el intercambio de energía ocurre de la región de mayor a la de menor temperatura por el movimiento



Figura 1.1. Determine los planos

cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como en el caso de los metales.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en término de ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como Ley de Fourier.

$$q = -k \times A \times \frac{a}{b}$$

Donde el signo menos indica que el calor fluye de un medio caliente a uno frío, **A** es el área de transferencia de calor perpendicular al eje x (m^2) y **k** es la conductividad térmica. El valor numérico de la conductividad térmica nos indica qué tan rápido fluirá el calor en un material dado y varía según el material (W/m.K). El mayor valor lo tienen los metales puros, el menor los gases y vapores.

Para la tabla 1.1 se considera que:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

α Difusidad térmica [m^2/s]

k Conductividad térmica

Algunos casos prácticos [5]

1. Flujo de calor unidimensional en el estado estable sin generación de calor.

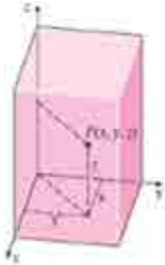
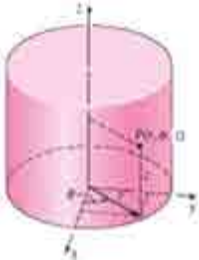
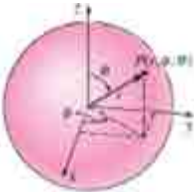
CASO	COORDENADAS	ECUACIÓN GENERAL
	Rectangulares	$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{\rho \cdot C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$
	Cilíndricas	$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$
	Esféricas	$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$

Tabla 1.1. Ecuaciones generales de conducción. [5]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

2. Flujo de calor unidimensional en coordenadas cilíndricas.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

3. Flujo de calor unidimensional en estado estacionario con fuentes de calor.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{g}{k} = 0$$

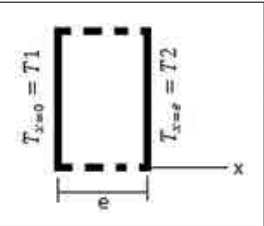
4. Conducción bidimensional en estado estacionario sin fuentes de calor.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

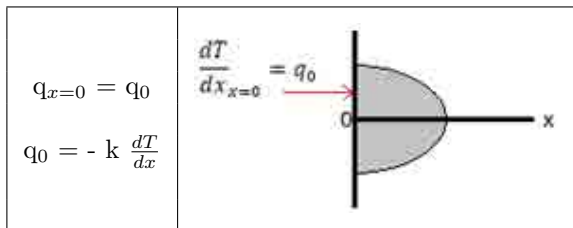
Condiciones de frontera [5]

En los problemas de conducción de calor que se encuentran en la práctica intervienen regiones adyacentes que pueden ser muy distintas, para estudiar estos problemas es necesario conocer las condiciones térmicas en cada una de las superficies de contacto; en general se requiere que tanto el flujo de calor por unidad de área como la temperatura sean continuas a través de la interfaz; así las soluciones de la ecuación de conducción en cada región deben estar ligadas. En el estudio de problemas de transferencia de calor más complejos, a menudo es conveniente desligar las regiones y considerarlas por separado. Así, la condición de contorno o de frontera es simplemente una temperatura conocida. Se pueden plantear cuatro clases de fronteras:

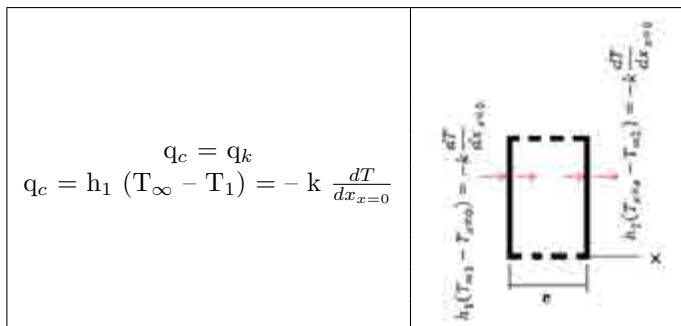
- 1. Primera clase (condición de Dirichlet): Se especifica el valor de la temperatura en dos puntos del cuerpo.

$x = 0$ $x = e$ <i>e espesor de la pared</i>	<i>Especificar:</i> $T_{x=0} = T1$ $T_{x=e} = T2$	
--	---	---

2. Segunda clase (condición de Neumann): Especifica el flujo de calor en una posición dada. Donde el flujo de calor es igual al producto de la conductividad térmica k del material por la derivada de la temperatura normal a la superficie.



3. Tercera clase (condición de Robin): Esta condición se da cuando se somete la superficie límite a una transferencia de calor por convección con un medio de temperatura conocida.

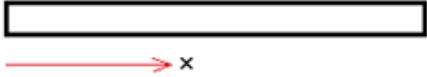


Si la frontera $x=e$ está aislada térmicamente, no existe ningún flujo de calor desde y hacia el cuerpo, entonces:

$$\frac{\partial T}{\partial x}_{x=e} = 0$$

4. Frontera móvil: Se llama condiciones de frontera móvil a las condiciones de problemas de radiación, convección, fusión o solidificación y ablación porque en ellos aparece la temperatura elevada a una potencia, lo que hace el análisis de los problemas de calor sometidos a condiciones móviles muy complejos, donde q_c representa el flujo de calor por condensación.

Por ejemplo para el campo de temperatura en un espacio de 1-D, tal como una barra mostrada a continuación, tenemos la siguiente ecuación de conducción de calor de Fourier:

$f_x = -k \frac{dT}{dx}$	 <p>The diagram shows a horizontal rectangular bar. Above the bar, the text $T(x,t)$ is written in blue. Below the bar, a red arrow points to the right, labeled with a bold black x.</p>
--------------------------	--

Donde:

f_x Flujo de calor por unidad de área.
 k Conductividad térmica.
 $T = T_{(x,t)}$ Conductividad térmica.

Para un problema en 3D, tenemos:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = -k \begin{Bmatrix} \frac{dT}{dx} \\ \frac{dT}{dy} \\ \frac{dT}{dz} \end{Bmatrix}$$

donde, f_x, f_y, f_z son el flujo de calor en la dirección del eje x, y y z respectivamente.

En caso de materiales isotrópicos, la matriz de conductividad es:

$$K = -k \begin{Bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{Bmatrix}$$

La ecuación de flujo de calor de gobierno es:

$$-k \left[\frac{dfx}{dx} + \frac{dfy}{dy} + \frac{dfz}{dz} \right] + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde:

q_v Tasa de generación interna de calor por unidad de volumen.
 C_p Calor específico.
 ρ Densidad.

Para el estado estacionario ($\partial T/\partial t = 0$) y materiales isotrópicos, podemos obtener:

$$k \cdot \nabla^2 T = -q_v$$

Esta es una ecuación de Poisson, que puede ser resuelta usando condiciones de frontera dadas.

Condiciones de frontera para problemas de conducción de calor en estado estacionario son:

$$\begin{array}{ll} T = \bar{T} & \text{En } S_T \\ Q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{Q} & \text{En } S_q \end{array}$$

Tenga en cuenta que en cualquier punto en el límite $S = S_T \cup S_q$, sólo un tipo de condiciones de frontera puede ser especificado.

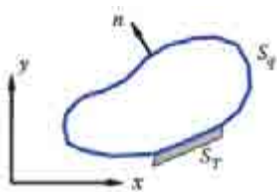


Figura 1.2. Condiciones de frontera en problemas de conducción de calor [3].

1.1.1.2. Transferencia de calor por convección [1],[2],[5]

Cuando el fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes, habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie, a este mecanismo de transferencia de calor se da el nombre de convección, que implica los efectos combinados de la conducción en la primera capa de fluido y del movimiento del fluido.

El gradiente de temperatura depende de la rapidez a la que el fluido conduce el calor, es decir, del campo de flujo. Se dice que la transferencia de calor es por Convección Forzada si el movimiento es inducido artificialmente, digamos con una bomba o un ventilador que impulse el fluido sobre la superficie; y que la transferencia de calor es por convección Libre o natural, si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas

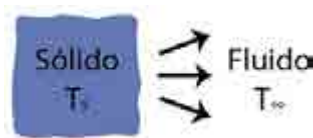


Figura 1.3. Representación gráfica de la convección de calor [1] [2]

de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección depende de la conductividad térmica, calor específico, la densidad del flujo, su viscosidad y de las temperaturas. Puede presentarse en diferentes formas:

- Interno, en el cual el fluido está confinado por la superficie.
- Externo, en el cual el fluido se encuentra fuera de la superficie.

ESQUEMA	CASO	CONFIGURACIÓN	T_{ref}	COEFICIENTE
	Confinado	Interno - Natural - Forzado	T_m	$h = \frac{q_c}{T_s - T_m}$
	No confinado	Externo - Natural - Forzado	T_{∞}	$h = \frac{q_c}{T_s - T_{\infty}}$

Tabla 1.2. Proceso básico de intercambio de calor convectivo [5]

1.1.1.3. **Transferencia de calor por radiación [1],[2]**

Cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto, no es posible la transferencia de calor entre ellos por

conducción o convección: en tal caso, la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica. Es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo debido a su temperatura, es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas de Maxwell o en forma de fotones discretos de acuerdo con la hipótesis de Planck, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La radiación térmica difiere de otras formas de radiación electromagnética como los rayos gamma, microondas, ondas de radio y de televisión, las cuales no se relacionan con la temperatura, siendo algunas de sus propiedades las siguientes:

- No requiere un medio material entre el sistema y sus alrededores.
- Es muy rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuaciones en el vacío.
- A mayor longitud de onda mayor frecuencia.

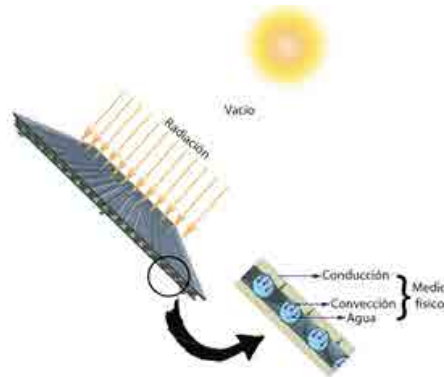


Figura 1.4. Representación gráfica de la radiación [5]

La radiación térmica es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados, sin embargo, suele considerarse como un fenómeno superficial en sólidos que son opacos a la radiación térmica, como metales, madera y roca, ya que la radiación térmica emitida por las regiones internas nunca pueden alcanzar la superficie y la incidente suele ser absorbida por esta.

Todos los cuerpos a una temperatura por encima del cero absoluto emiten radiación térmica. Toda la energía radiante que sale del cuerpo se

llama el poder emisorio total y depende de la potencia real de la superficie y de la temperatura de la pared (dependencia que es no lineal).

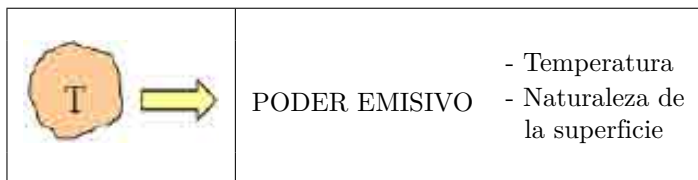


Figura 1.5. Representación gráfica del poder emisorio [5]

Esta energía que sale o se emite con una longitud de onda se define como poder emisorio espectral ($W/m^2.\mu$).

Ley de Stefan-Boltzman [5]

Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es proporcional a las diferencias en T^4 , de tal forma que la tasa de radiación máxima que puede emitirse desde una superficie a una temperatura absoluta es:

$$Q_{emitmax} = \sigma.A.T^4 \quad (W)$$

Donde:

A Área de la superficie.

σ Constante de Boltzman, equivalente a ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

La superficie idealizada que emite radiación a esta tasa máxima recibe el nombre de cuerpo negro. La radiación emitida por superficies reales es menor que la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$Q_{emitmax} = \epsilon.\sigma.A.T^4 \quad (W)$$

Donde:

ϵ Emisividad de la superficie, que varía entre cero y uno; para un reflector ideal $\epsilon=0$ y para un cuerpo negro $\epsilon=1$. No todas las radiaciones que dejan una superficie alcanzarán la otra superficie.

Por ejemplo, un cuerpo negro de área superficial A y la temperatura absoluta T_s está dentro de un recinto de temperatura absoluta T_p . El cuerpo emitirá energía radiante en cantidad $\epsilon \sigma A T_s^4$, y absorberá energía radiante en cantidad $\epsilon \sigma A T_p^4$, así que la energía radiante neta que sale del cuerpo será:

$$Q_{Rneto} = \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_p^4)$$

Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto y si ambos guardan una relación geométrica entre sí la energía radiante neta que sale del cuerpo será:

$$Q_{Rneto} = \sigma \cdot F \cdot A \cdot (T_s^4 - T_p^4)$$

Donde:

- F Magnitud adimensional menor que la unidad, que modifica la ecuación para los radiadores perfectos de manera que tengan en cuenta las emitancias y la distribución relativa de las superficies.

Las superficies también pueden transferir simultáneamente calor por convección a un gas contiguo. La velocidad total de transferencia de calor desde la superficie entonces, tenemos:

$$q = q_{conv} + q_{rad} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) + \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_p^4)$$

Capítulo 2

Selección de material en Ansys

2.1. Manejo de materiales y sus propiedades

Para el análisis térmico de sistemas, la primera etapa importante es la selección o creación de materiales de los cuerpos y la indicación de sus propiedades. Para esto en el software existe un módulo de manejo de materiales, enlazado con el bloque de análisis.

A continuación se describe el procedimiento correspondiente.

2.2. Interfaz gráfico del módulo de manejo de materiales

Área de manejo de materiales está diseñada de tal forma que permite la creación, conservación y recuperación de materiales y también la generación de las bibliotecas de datos, que pueden ser guardados y utilizados en los proyectos de otros usuarios. El módulo es representado con el elemento **Engineering Data** (Figura 2.1), incluido en la estructura del bloque de análisis.

Para arrancar el módulo de manejo de materiales se presiona el botón derecho del ratón en la línea del elemento Engineering Data y seleccionar la opción Edit (Figura 2.2).

Luego se carga el área de trabajo, en la cual se puede realizar el manejo de materiales y conservar los datos para la utilización en proyectos. Si el elemento Engineering Data está vinculado con el elemento análogo de




Figura 2.1




Figura 2.2

otro bloque de análisis, entonces la modificación de datos en un bloque afecta los del otro. Todos los datos introducidos en el módulo se guardan automáticamente al grabar el proyecto. El área de trabajo del módulo de manejo de materiales puede ser modificado con la opción View, de la barra de herramientas. En la (Figura 2.3) se muestran las posibles configuraciones del área de trabajo.

La descripción de la estructura del área de trabajo está presentada en la (Tabla 2.1).

En la barra de herramientas adicionalmente se ubica el botón de filtro , que permite visualizar sólo los parámetros que pueden ser utilizados en la selección actual. Por defecto este botón está activo.

La ventana de las propiedades de los materiales (Toolbox) contiene

las propiedades y modelos físicos de los materiales. Si el botón  está activado, el bloque de manejo de los materiales filtra los contenidos de tal manera que se visualizan solo los elementos aplicables para la selección actual.

Leyenda	Encabezado de la ventana	Descripción
A	Toolbox (ventana de propiedades de materiales)	Contiene propiedades, que pueden ser utilizadas al seleccionar los materiales.
B	Outline Filter (ventana de fuentes de datos)	Visualiza las fuentes de datos de los materiales, su ubicación y descripción.
C	Outline Pane (panel de estructura de datos)	Visualiza la estructura de la fuente seleccionada en la ventana.
D	Properties Pane (panel de propiedades)	Visualiza las propiedades del elemento seleccionado en el panel de estructura de datos (Outline Pane).
E	Table Pane (panel de tablas)	Visualiza los datos tabulados de elemento seleccionado en el panel de propiedades (Properties Pane).
F	Chart Pane (panel de diagramas)	Visualiza el diagrama del elemento seleccionado en el panel de propiedades (Properties Pane).

Tabla 2.1. Descripción del área del trabajo [4]

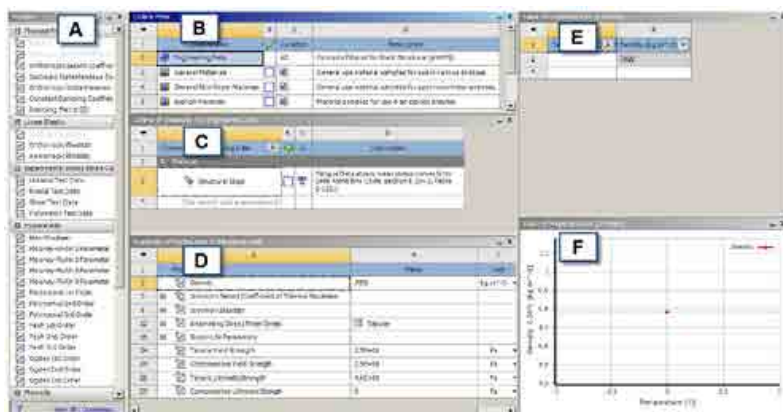


Figura 2.3

2.2.1. Selección del material existente en la librería


La columna de contenidos **Outline Pane** muestra el nombre del material, contenido en la fuente de datos seleccionada. El tipo y el estado del material se indica con un icono que se encuentra a la izquierda del nombre. El estado del material se indica de la siguiente manera:





Indica que los datos contenidos en este material son aceptables.



Indica que algunos de los datos contenidos en el material están definidos incorrectamente.

La columna para la opción de suprimir el material (*Suppression*) está marcada con el símbolo  y muestra el estatus del elemento. Haciendo click en esta columna frente del elemento, seleccionándose puede excluir lo del análisis sin eliminar lo de la fuente de datos.

La columna de agregación (Add) sirve para agregar un elemento de la fuente de datos a selección actual de los materiales y también muestra si un elemento está incluido en el análisis. Para agregar el material al análisis se presiona en el botón de adición  y si el elemento está incluido en la selección actual, es marcado con el dibujo .

2.2.2. Procedimiento para la creación del nuevo material

1. Abrir el Workbench.
2. Escoger el caso de estudio (Analysis Systems) dándole doble click (ver figura 2.4).



Figura 2.4

3. Hacer doble click en Engineering Data y abrimos la siguiente pantalla (Ver Figura 2.5).

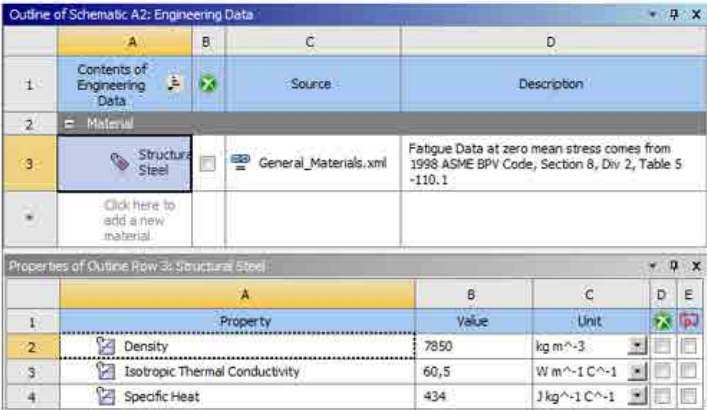


Figura 2.5

4. - Hacer clic en Engineering Data Sources ; luego dentro de las galerías de materiales seleccionamos donde queremos guardar nuestro nuevo material, y en el siguiente recuadro colocamos el nombre del nuevo material (Ver Figura 2.6).

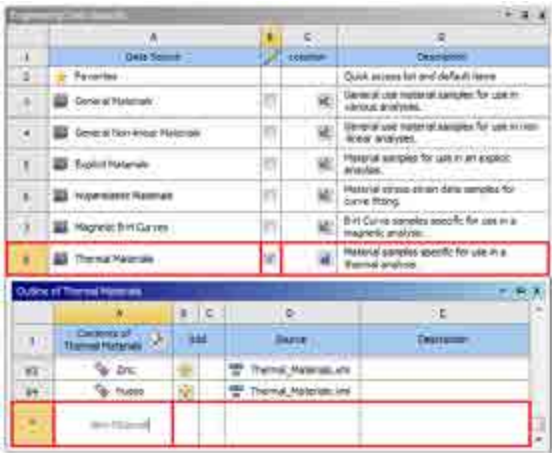


Figura 2.6

5. Para este nuevo material seleccionamos las propiedades que se requieren para el análisis en la barra de Toolbox, arrastrando las al recuadro de Properties of Outline del nuevo material (Ver Figura 2.7).

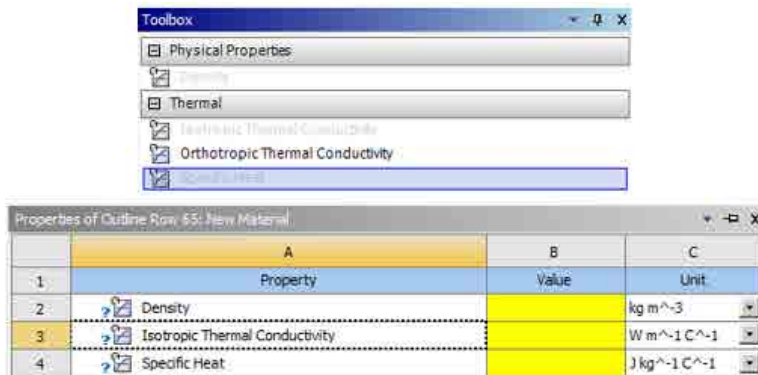


Figura 2.7

6. Colocar los valores de las propiedades del nuevo material en los recuadros amarillos considerando las unidades que vamos a usar para el análisis, luego las guardamos en la galería de materiales (Ver Figura 2.8).

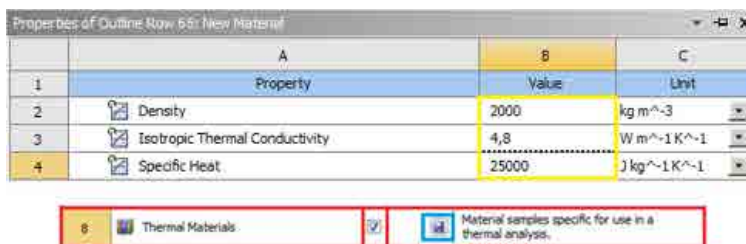


Figura 2.8

7. Deseleccionar la ventana de fuentes de datos, y luego adjuntar el material creado (Ver Figura 2.9).



Figura 2.9

8. Damos click en Engineering Data Sources, y el nuevo material agregado debe estar en la lista (Ver Figura 2.10).

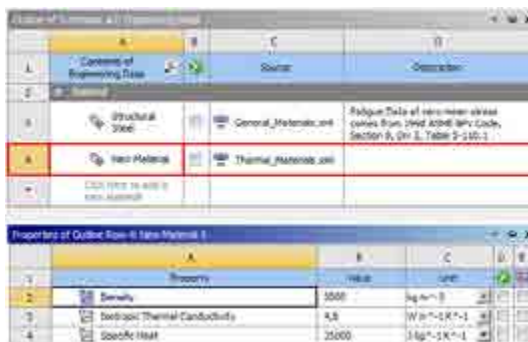


Figura 2.10

Si se trabaja con la versión educativa no podrá grabar nuevos materiales en la librería, en este caso puede crear nueva carpeta en la librería y guardar la en la carpeta de proyecto, luego crear nuevo material y grabar en ella.

2.2.3. Condiciones de contorno térmicas

Las condiciones de contorno se pueden aplicar de la siguiente manera.

Heat Flow

- Una tasa de flujo de calor se puede aplicar a un vértice, una arista o superficie.
- El flujo de calor tiene unidades de energía / hora.

Heat Flux



- flujo de calor se puede aplicar sólo a las superficies (bordes en 2D).
- Flujo de calor tiene unidades de energía / tiempo / área.

Internal Heat Generation



- Una tasa de generación interna de calor se puede aplicar a sólo cuerpos.
- La generación de calor tiene unidades de energía / tiempo / volumen.

Temperatura, convección y radiación:

Al menos un tipo de condición térmica que contiene temperatura $\{T\}$ debe estar presente para limitar el problema.

- *Temperatura $\{T\}$:*



Impone una temperatura de vértices, aristas, superficies o cuerpos.

- *Convección:*



$$q_c = hA(T_{surface} - T_{ambient})$$

- *Radación:*



$$q_R = \sigma \epsilon A (T_{surface}^4 - T_{ambient}^4)$$

Donde:

- σ constante de Stefan-Boltzman
- ϵ emisividad
- A área de superficie radiante
- F factor de forma

2.2.4. Problema 1: Difusión de calor

En un proceso transiente de difusión de calor en un objeto (Figura 2.11) en forma circular con propiedades constantes, se tiene la distribución de temperatura, calculada numéricamente con el método de volúmenes finitos implementado en Fortran [10], estos valores de temperatura se comparan con los resultados obtenidos de la solución con software ANSYS.

Situación física

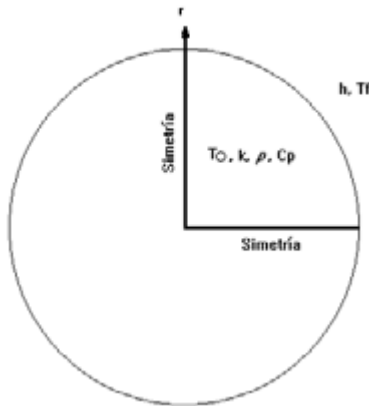


Figura 2.11

Datos iniciales:

T_{amb}	330 K	Temperatura ambiente
T_{elem}	298 K	Temperatura del elemento
D_{elem}	0.04 m	Diámetro del elemento
k_{elem}	4.87 W/m.K	Conductividad térmica del elemento
ρ_{elem}	2195.27 kg/m ³	Densidad del elemento
$C_{p_{elem}}$	12856.92 J/kg.K	Calor específico del elemento

Procedimiento de análisis en ANSYS

1. Ingresando a la Carpeta de Ansys y seleccionando con doble click en Workbench 16.0

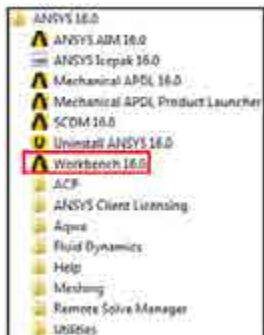


Figura 2.12

2. En la siguiente ventana con doble click en Transient Thermal se representa el flujo de trabajo.

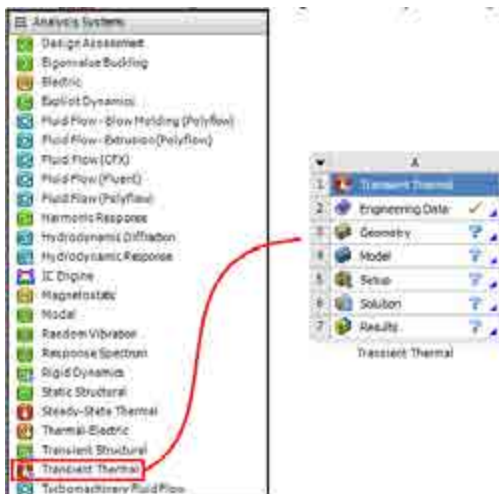


Figura 2.13

3. En la representación gráfica de flujo le damos click derecho y seleccionamos propiedades (Properties); luego seleccionamos geometría (Geometry) observando las propiedades a lado derecho de la pantalla y nos dirigimos a opciones avanzadas de geometría (Advanced Geometry Options), cambiando a 2D el tipo de análisis (Analysis Type).

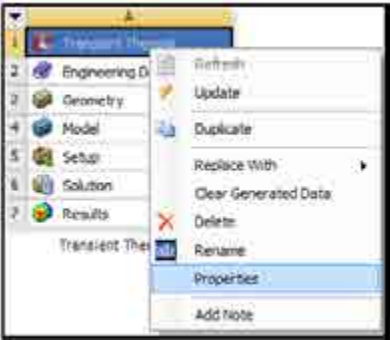


Figura 2.14



Figura 2.15












4. Con doble click en **Geometry** y dibujada la situación física del problema 1, se selecciona el plano XYPlane () , luego seleccionar **Look At Face/Plane/Sketch** () para obtener una vista frontal del elemento; seleccionamos Sketching, Draw (, ) y seleccionamos **Arc by Center** () dibujando 3/4 de una circunferencia, seleccionamos **Line** () y cerramos el elemento desde el centro, luego nos vamos a **Dimensions** y seleccionamos **General** () damos click en la línea del elemento y le damos 20 mm de radio, posteriormente nos vamos al menú principal y seleccionamos **Concept** y luego **Surfaces From Sketches** () posteriormente damos click en **Generate** () y se genera una superficie en el elemento. Luego cerramos la ventana de **Geometry**.



Figura 2.16

5. Ahora nos vamos a generar el mallado del elemento, seleccionamos **Mesh**, dentro de esta ventana se realiza un mallado por defecto; este mallado por defecto se realiza dando derecho sobre Mesh () y damos click en generar malla () .

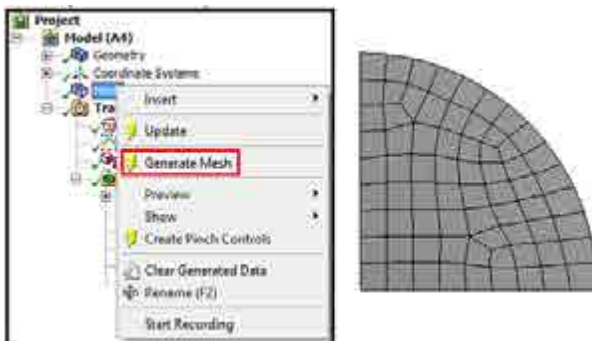



Figura 2.17

6. Luego se va a colocar las condiciones iniciales del problema, damos click en temperatura inicial () y nos da una tabla de descripción donde colocamos un valor de 24.85 °C.

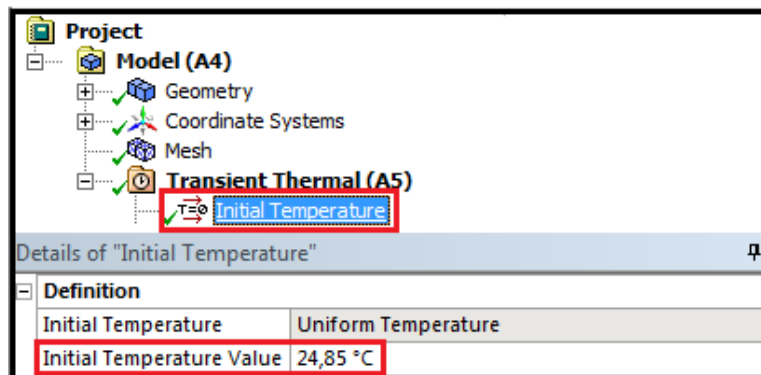



Figura 2.18

7. A continuación realizamos un ajuste del análisis () colocando los siguientes valores mostrados en la gráfica.

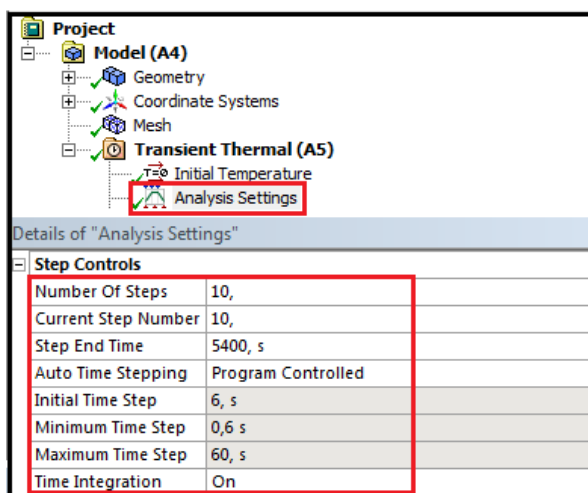


Figura 2.19

8. Se coloca la temperatura en la frontera para realizar la transferencia de calor interna en el elemento; seleccionando (✓🔥 Temperature), aparecen los detalles donde se selecciona la condición de frontera y temperatura. Para la condición de frontera se selecciona el borde que se marca con rojo en el gráfico y se acepta en geometría.

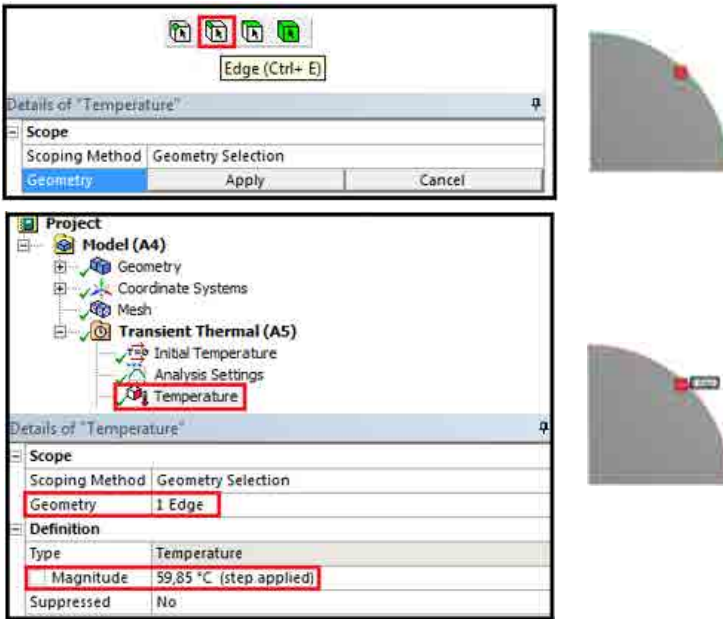


Figura 2.20

9. Inserto los resultados requeridos y con click derecho sobre solución (A6) (✓📊 Solution Information), luego, Insert – Thermal – Temperature.

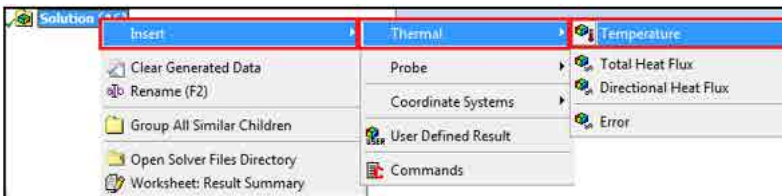


Figura 2.21

10. Selecciono el lugar de donde deseo obtener los resultados mediante la opción examinar (Probe), y seleccionamos el centro del elemento. Dando click derecho sobre temperatura.

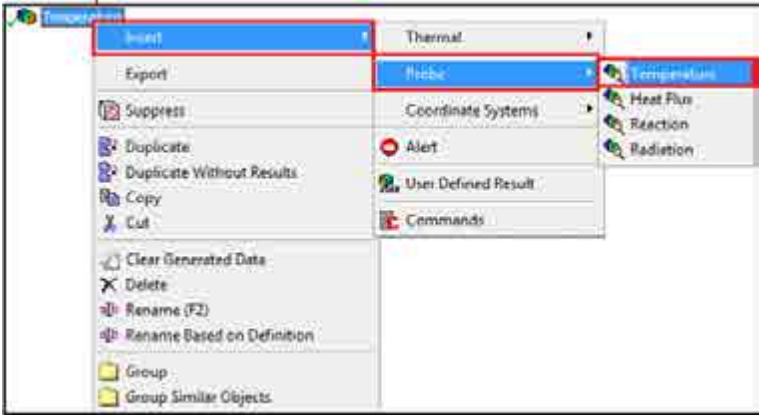


Figura 2.22

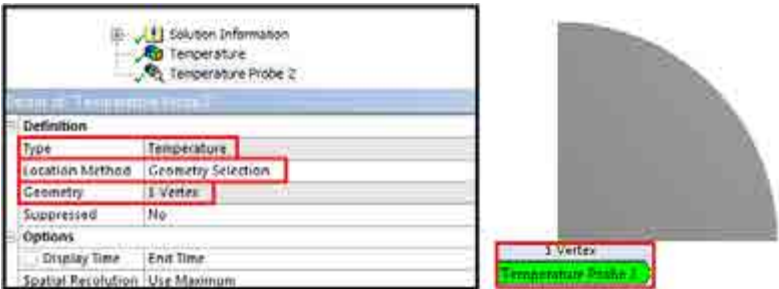
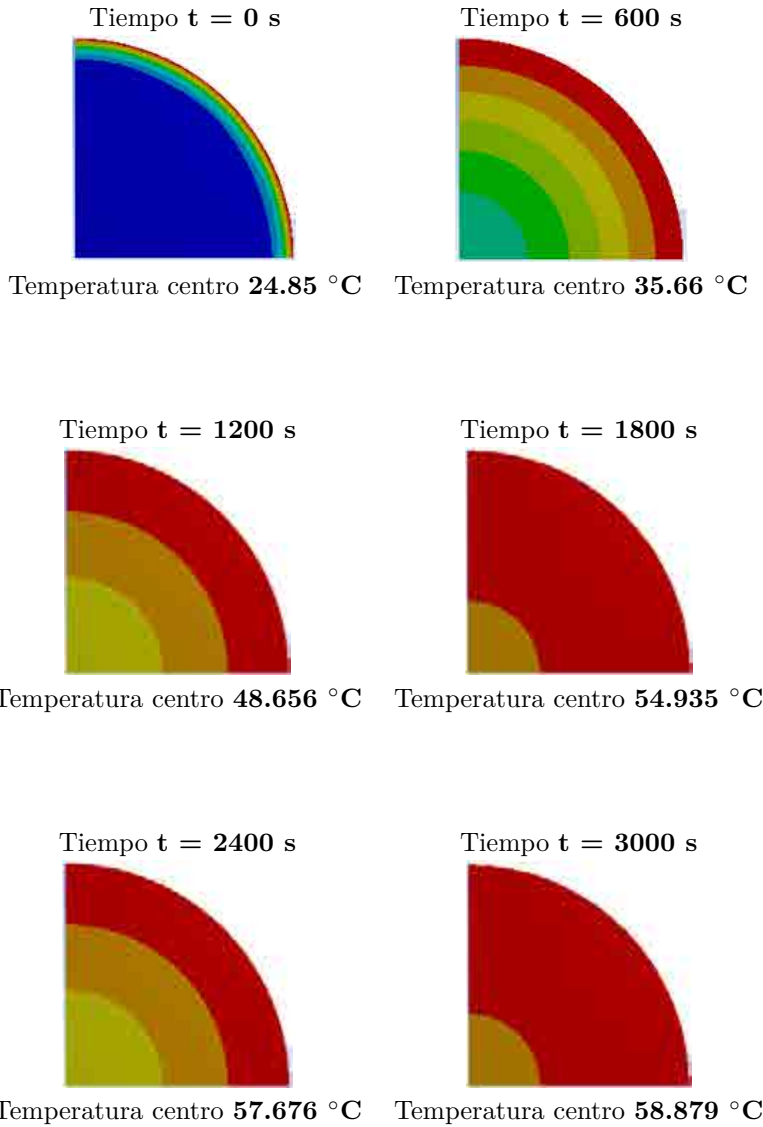


Figura 2.23

11. Una vez realizado todos estos procesos, se da click en resolver (Solve) para obtener las variaciones de temperatura en el centro del elemento.

Resultados:



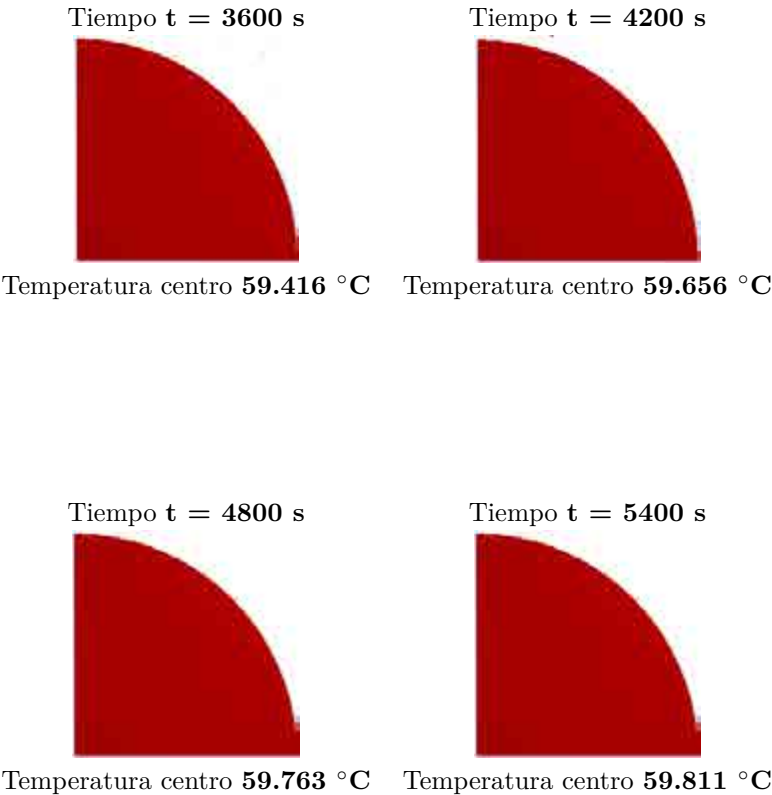


Figura 2.24

2.2.5. Validación de resultados

En la tabla 2.2 se puede observar los datos de la variación de la temperatura con respecto al tiempo obtenidos mediante el cálculo en Ansys y los calculados mediante el método de volúmenes finitos [10]; en la Figura 2.25, su representación gráfica.

Paúl Torres (Volúmenes finitos)		ANSYS 16.0	
Tiempo (s)	Temperatura (°K)	Tiempo (s)	Temperatura (°K)
0	298	0	297,85
600	308,17	600	308,667
1200	320,25	1200	321,656
1800	325,58	1800	327,935
2400	327,87	2400	330,676
3000	328,79	3000	331,879
3600	329,03	3600	332,416
4200	329,17	4200	332,656
4800	329,26	4800	332,763
5400	329,33	5400	332,811

Tabla 2.2

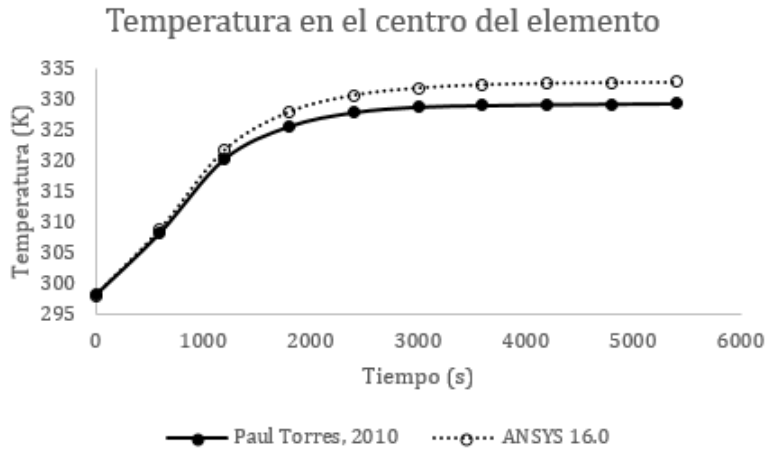


Figura 2.25. Gráfica comparativa

2.2.6. Problema 2: Incropera, ejemplo 5.7; p. 253

Un elemento combustible de un reactor nuclear en la forma de pared plana de espesor $2L=20\text{mm}$ se enfría convectivamente en ambas superficies, con $h=1100\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $T_{\infty}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$. A potencia normal de operación, el calor se genera de modo uniforme dentro del elemento a una

rapidez volumétrica de $q'=10^7 \text{ W/m}^3$. Si hay un cambio en la rapidez de generación, ocurrirá una desviación de las condiciones de estado estable asociada con la operación normal. Considere un cambio súbito a $q'=2.10^7 \text{ W/m}^3$, determinar la distribución de temperaturas del elemento combustible después de 1,5 s. Las propiedades térmicas del elemento combustible son $k=30 \text{ W/m.K}$ y $\rho=19816 \text{ kg/m}^3$, $C_p=300\text{J/kg.K}$

$$\alpha = \frac{k}{C_p} \text{ Difusividad Térmica } \left(\frac{m^2}{s} \right)$$
$$\alpha = 5,10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Situación física

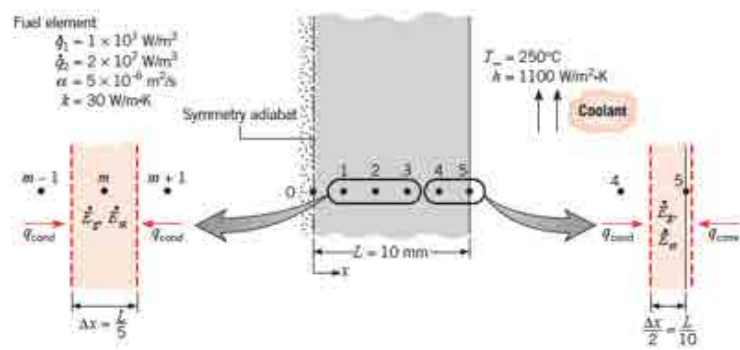


Figura 2.26. Situación física [10]

Procedimiento de análisis con Ansys

1. Generar un nuevo material (Uranio) como se explica en la sección de la elección de Material en Ansys, con las siguientes propiedades:

Conductividad Térmica	30 W/m.K
Densidad	19816 kg/m ³
Calor Específico	300J/kg.K

2. Dibujar el elemento rectangular de 10 x 5 mm (figura 2.27).



Figura 2.27

3. Crear los puntos en los cuales se quiere visualizar la solución, haciendo click derecho en **surfaceSk1**, luego seleccionar **insert** y dar click en **Point** (figura 2.28).

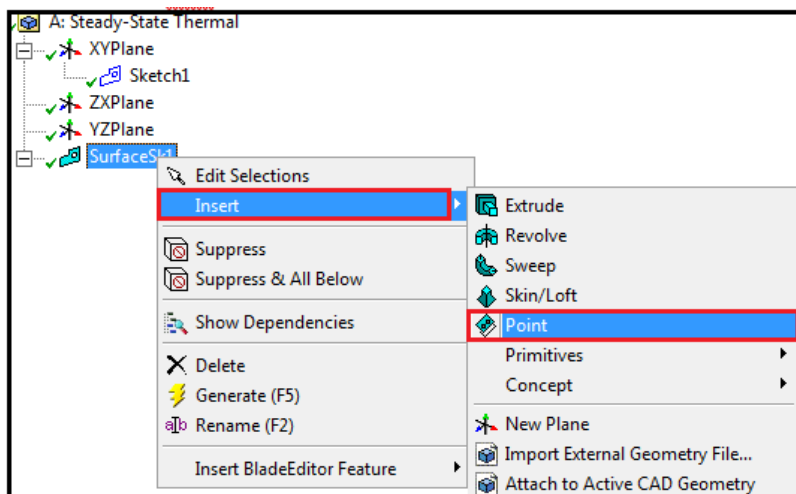


Figura 2.28

4. Dar click en **Point** y modificar algunos datos dentro del **Details View** para generar los puntos necesarios dentro del elemento (figura 2.29).

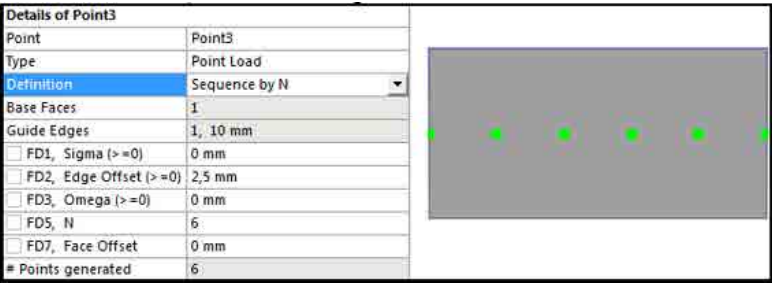


Figura 2.29

5. Generar el mallado del elemento con doble click en (🔌 Mesh) y generar la malla con (⚡ Generate Mesh) (figura 2.30).

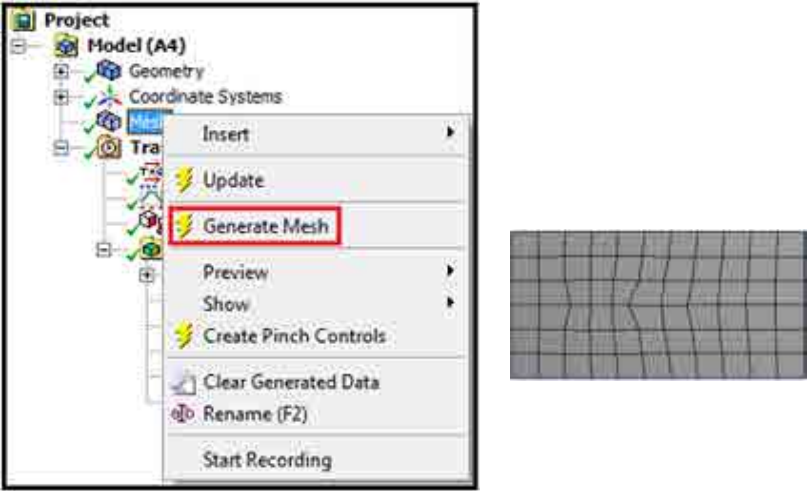


Figura 2.30

6. Luego se va a colocar las condiciones iniciales del problema, damos click en temperatura inicial (📌 Initial Temperature) y nos da una tabla de descripción donde colocamos un valor de 22 °C.

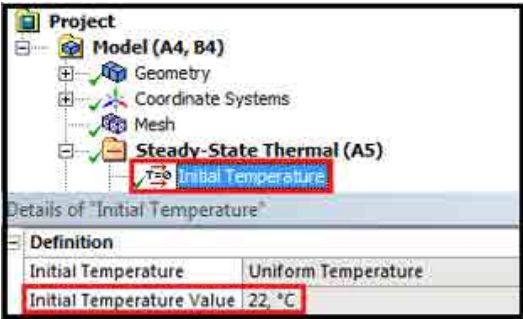


Figura 2.31

7. A continuación realizamos un ajuste del análisis (📌 Analysis Settings) colocando los siguientes valores mostrados en la gráfica.

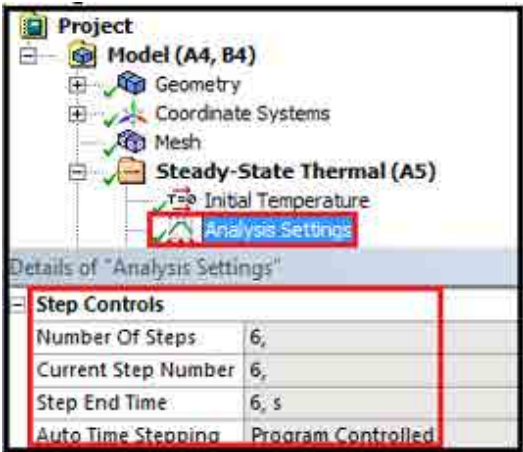


Figura 2.32

8. A continuación se define los tipos de transferencia de calor correspondientes a la situación física del problema; hacemos click derecho en ajuste de análisis (📌 Analysis Settings), y seleccionamos convec-

ción (🔌 Convection), flujo de calor (🔌 Heat Flow) y generación interna de calor (🔌 Internal Heat Generation).

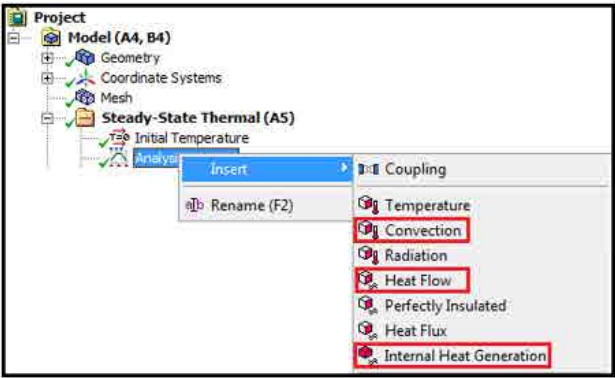


Figura 2.33

9. Colocar los datos correspondientes a la convección de calor seleccionando la frontera correspondiente (color amarillo), donde el coeficiente convectivo es de $1100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ y la temperatura en la pared es de $250 \text{ }^\circ\text{C}$; como se muestra a continuación (figura 2.34).

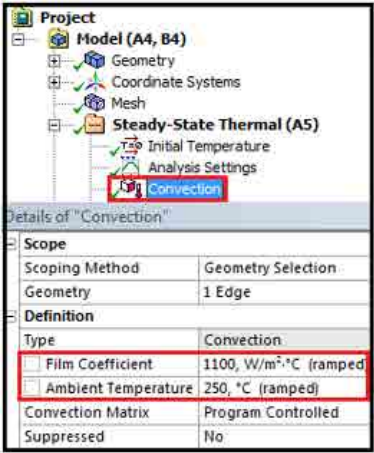


Figura 2.34

10. Indicar la simetría colocando el flujo de calor con valor 0 W en la pared seleccionada (figura 2.35).

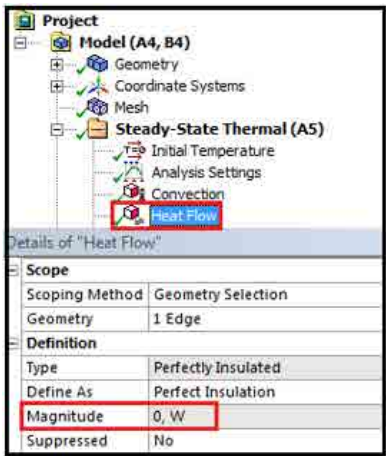


Figura 2.35

11. Luego seleccionar la generación de calor interna y para todo el elemento un valor de $1 \times 10^7 \text{ W/m}^3$ (figura 2.36).

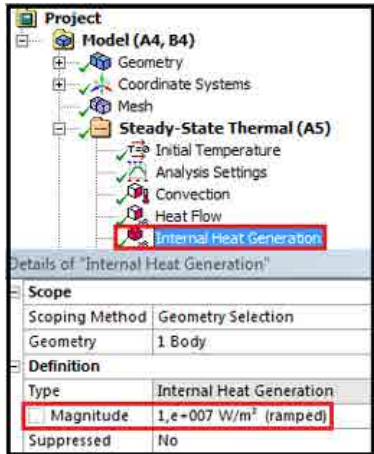


Figura 2.36

12. Insertar los resultados que se requiere en el análisis, haciendo click derecho sobre solución (A6) (Heat Flow), luego, Insert – Thermal – Temperature (figura 2.37).



Figura 2.37

13. - Dar click derecho en **Temperature**, luego **Insert-Probe-Temperature**, abriendo la ventana de detalles, donde seleccionamos en **Geometry Selection** los seis puntos en los que queremos visualizar los resultados (figura 2.38).

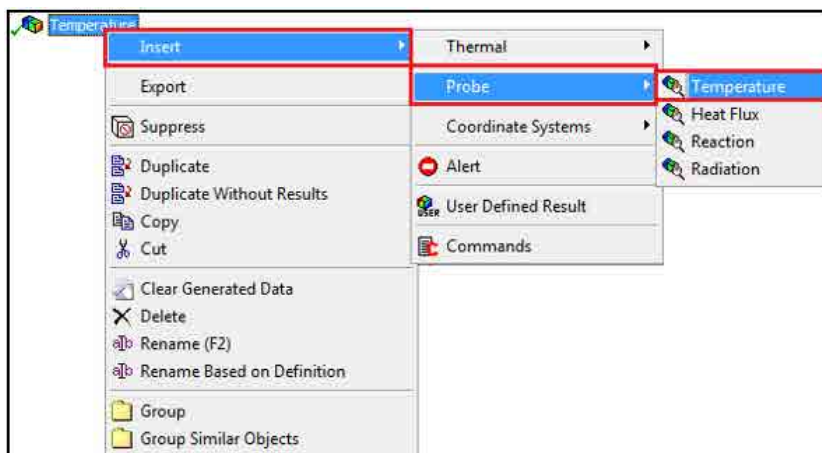


Figura 2.38

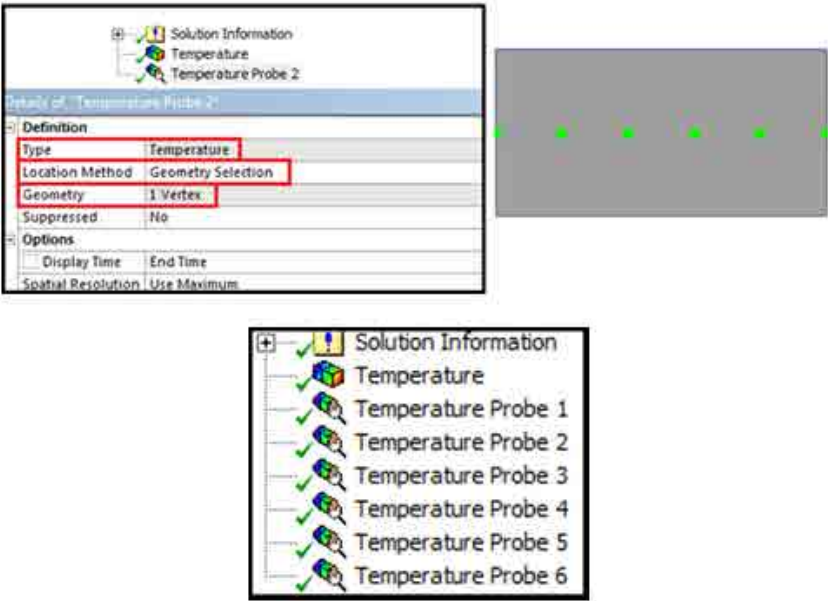


Figura 2.39

14. - Dar click en resolver (🚧 Solver) para obtener la distribución de temperatura en el elemento (figura 2.40).

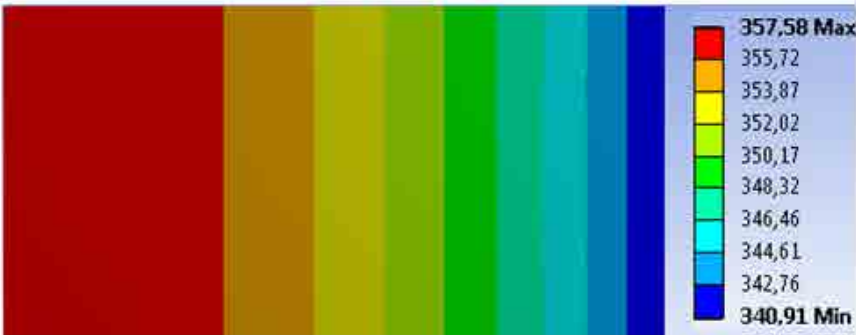


Figura 2.40

15. - A continuación acoplar el análisis transitorio con el estacionario con el objetivo de usar los resultados del análisis del estado estacionario como condiciones iniciales para el estado transitorio (figura 2.41).

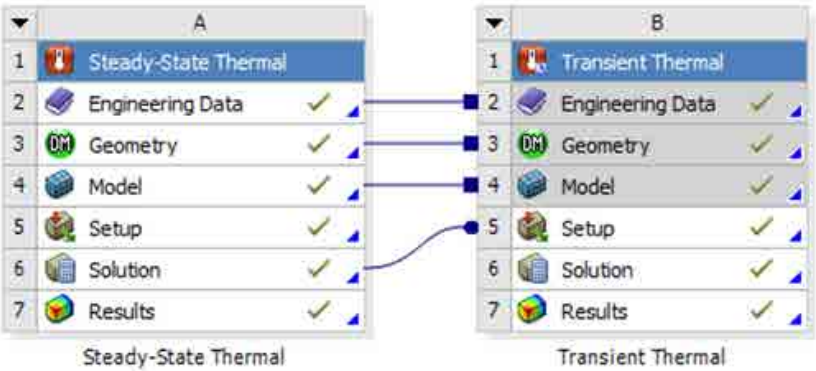



Figura 2.41

16. - Una vez realizado este proceso, dar click en resolver ( Solve), para obtener la variación de temperatura en los distintos puntos del elemento en el tiempo (figura 2.42):

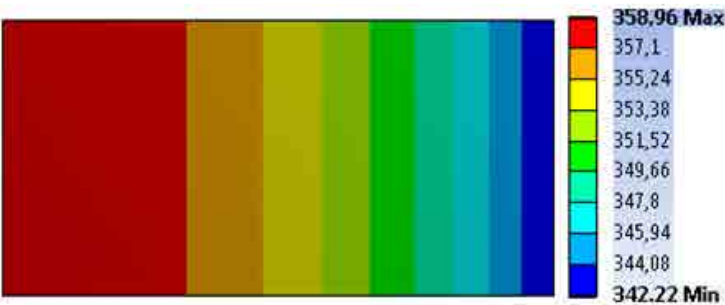


Figura 2.42

2.2.7. Comparación de resultados

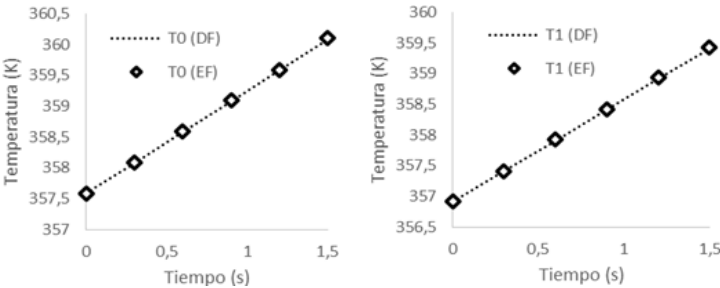
En las tablas 2.3 y 2.4 se puede observar la variación de temperatura en los puntos seleccionados, obtenida con el método de diferencias finitas [6] y mediante Ansys, y en la figura 2.43 se puede apreciar la coincidencia de los resultados.

Diferencias Finitas						
Tiempo (s)	T ₀ (°K)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)	T ₅ (°K)
0	357,58	356,91	354,91	351,58	346,91	340,91
0,3	358,08	357,41	355,41	352,08	347,41	341,41
0,6	358,58	357,91	355,91	352,58	347,91	341,88
0,9	359,08	358,41	356,41	353,08	348,41	342,35
1,2	359,58	358,91	356,91	353,58	348,89	342,82
1,5	360,08	559,41	357,41	354,07	349,37	343,27

Tabla 2.3. Tabla de valores obtenidos mediante el método de diferencias finitas. [1]

Solución con ANSYS						
Tiempo (s)	T ₀ (°K)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)	T ₅ (°K)
0	357,58	356,91	354,91	351,58	346,91	340,91
0,3	358,08	357,41	355,41	352,08	347,41	341,4
0,6	358,59	357,92	355,92	352,58	347,91	341,87
0,9	359,09	358,42	356,42	353,09	348,4	342,34
1,2	359,59	358,93	356,93	353,58	348,89	342,8
1,5	360,1	359,43	357,43	354,08	349,37	343,25

Tabla 2.4. Tabla de valores obtenidos mediante Ansys.



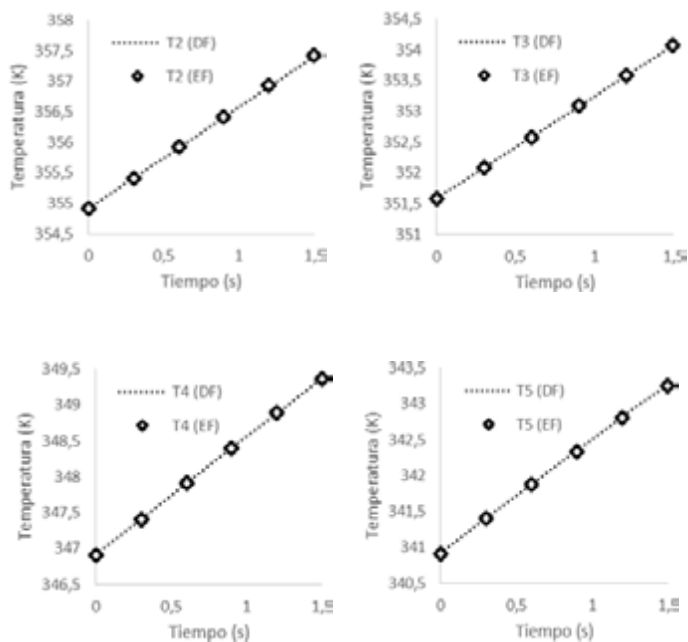


Figura 2.43. Gráficas comparativas.

Parte II

Conceptos básicos de la Mecánica de Fluidos

Capítulo 3

Mecánica de fluidos

3.1. Introducción a los fluidos mediante Ansys Workbench 16.0.

3.1.1. Clasificación de los flujos de fluidos

Dentro de la mecánica de fluidos se puede entender por flujo las siguientes definiciones:

- Interno o externo; (Flujo no limitado sobre una superficie es flujo externo, flujo confinado por superficies es interno).
- Laminar o turbulento (Flujos suaves, ordenados son laminares; flujos caóticos son turbulentos).
- Compresible o incompresible (flujos compresibles se caracterizan por la variación de la densidad del fluido, en cambio los flujos con densidad constante se llaman incompresibles).
- No forzado (natural) o forzado (es obligado a fluir con un dispositivo externo como una bomba o un ventilador, el flujo no forzado es impulsado por medios naturales como el efecto de flotación, o fuerza de gravedad).
- Estacionario o transitorio (si las propiedades del fluido en un punto no cambian con el tiempo el flujo es estacionario, si hay la variación de las propiedades es transitorio).
- Unidimensional, bidimensional o tridimensional (si las propiedades del flujo varían sólo en una dirección el flujo es unidimensional, si hay cambios en dos direcciones es bi-dimensional y en tres es tri-dimensional).

3.1.2. Ecuaciones de conservación de los fluidos

El movimiento de los fluidos y transferencia de calor están gobernados por las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Para completar el sistema de ecuaciones diferenciales, que permita su resolución, se utilizan las ecuaciones de estado (Tabla 3.1).

Masa	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$
x-momentum	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho) u \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx}$
y-momentum	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho) v \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My}$
z-momentum	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho) w \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz}$
Energía	$\frac{\partial(\rho \dot{e})}{\partial t} + \text{div}(\rho) \dot{e} \mathbf{u} = -\rho \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad} T) + \Phi + S_i$
Ecuaciones de estado	$p = p(\rho, T)_y \quad i = i(\rho, T)$

Tabla 3.1. Ecuaciones de conservación.

3.1.3. Turbulencia [8]

El número de Reynolds de un flujo da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas con los efectos convectivos, y las fuerzas viscosas. En experimentos con fluidos se observa que para valores inferiores a un número de Reynolds denominado crítico, el flujo es intrínsecamente estable y las capas de fluido adyacentes se deslizan unas sobre otras de forma ordenada. El régimen del flujo se denomina laminar. Si el flujo tiene un valor del número de Reynolds por encima del denominado crítico, se manifiestan en éste unas perturbaciones que dan lugar a un cambio radical del carácter del flujo. El movimiento se vuelve intrínsecamente no estacionario, incluso con condiciones de contorno

constantes. Este régimen se denomina flujo turbulento.

La turbulencia se define como el estado de movimiento de un fluido en el que las distintas variables relevantes (presión, velocidad, etc.) fluctúan de una forma desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico en el que las distintas variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo y estos valores varían de una forma aleatoria y desordenada. La descripción del movimiento de las partículas fluidas debido al efecto de la turbulencia resulta altamente complejo y constituye un problema aún sin solución desde el punto de vista de los métodos numéricos.

3.1.3.1. Modelos de turbulencia en Ansys CFX [8]

Se han desarrollado varios modelos que se pueden usar para aproximar la turbulencia. Algunos tienen aplicaciones muy específicas, mientras que otros pueden aplicarse a una clase más amplia de flujos con un grado razonable de confianza. La aplicación de algunos modelos incorporados en el software se presentan a continuación.

Laminar Model

Se aplica a flujos con bajo número de Reynolds (por ejemplo, para el flujo de tuberías, el régimen de flujo laminar es $Re < 1000$). Siempre debe verificar en el archivo de salida que el número máximo de Reynolds se encuentra en el régimen de flujo laminar. Si configura una simulación usando flujo laminar, pero el flujo real es turbulento, la convergencia es difícil y la simulación no alcanzará la solución correcta.

Zero Equation Model

El modelo Zero Equation Model es simple de implementar y usar, puede producir resultados aproximados muy rápidamente y proporciona una buena estimación inicial para simulaciones que usan modelos de turbulencia más avanzados.. No debe usar este modelo para obtener resultados finales.

k-epsilon Model

Si bien el modelo $k-\epsilon$, proporciona buenas predicciones para muchos flujos de interés de ingeniería, existen aplicaciones para las cuales estos

modelos pueden no ser adecuados. Entre estos están:

- Flujos con separación de capa límite.
- Flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media.
- Flujos en fluidos rotativos.
- Fluye sobre superficies curvas.

RNG k-epsilon Model

El modelo RNG k- ε es una alternativa al modelo estándar k- ε . En general, ofrece poca mejora en comparación con el modelo estándar k- ε .

k-omega y SSTModels

Son recomendables para la predicción de la separación del flujo desde una superficie lisa. Este es un fenómeno importante en muchas aplicaciones técnicas, particularmente para la aerodinámica del avión, ya que las características de pérdida de un avión se controlan por la separación de flujo del ala.

Reynolds Stress Model

Reynolds Stress Model (SMC) incluye los efectos de la curvatura aerodinámica, los cambios repentinos en la velocidad de deformación y los flujos secundarios. Puede considerar usar un modelo de Reynolds Stress en los siguientes tipos de flujo:

- Fluidos rotativos.
- Flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media.
- Flujos donde los campos de deformación son complejos y reproducen la naturaleza anisotrópica de la turbulencia en sí misma.
- Flujos con una fuerte curvatura aerodinámica.
- Flujo secundario.
- Flujo flotante.
- Son más adecuados para flujos complejos.

Omega-Based Reynolds Stress Models

Se utiliza para la simulación de capas límite.

The Large Eddy Simulation Model

Los flujos turbulentos contienen una amplia gama de escalas de longitud y tiempo, siendo los movimientos a gran escala generalmente más energéticos que los de pequeña escala. La predicción de problemas de flujo fluctuantes de importancia industrial puede realizarse utilizando la técnica de LES. LES es un enfoque que resuelve los movimientos fluctuantes a gran escala y utiliza modelos de turbulencia en escala "sub-grid" para el movimiento a pequeña escala.

Antes de comenzar una simulación de LES, debe considerar si es el enfoque de solución más apropiado. Para números bajos de Reynolds, es decir, $Re < 5000$, o cuando es importante poder resolver todas las escalas (por ejemplo, para la transición a flujo turbulento) considere DNS si tiene una computadora grande disponible. Para números más altos de Reynolds, LES podría ser una opción adecuada para los casos en que:

- Es probable que el flujo sea inestable, con aleteo a gran escala de una capa de corte o desprendimiento de vórtices.
- Es probable que el flujo sea inestable con estructuras coherentes (ciclón, luz intermitente).
- Hay simetrías en la geometría y el flujo, que podrían causar bifurcaciones de ruptura de simetría.
- El flujo es boyante, con grandes regiones inestables creadas por el calentamiento desde abajo, o por un fluido más ligero por debajo del fluido más pesado (flujos multifásicos en tuberías inclinadas).
- Se sabe que el enfoque de RANS convencional falla (por ejemplo, debido a la turbulencia altamente anisotrópica).
- Se requiere una buena representación de la estructura turbulenta para procesos a pequeña escala, como micromezcla o reacción química.
- El ruido del flujo debe calcularse, y especialmente cuando la contribución de banda ancha es significativa.

- Se requiere otra información fluctuante (por ejemplo, fuerzas fluctuantes, ráfagas de viento).
- El usuario puede permitirse esperar hasta una semana para obtener resultados.
- No se recomienda utilizar LES para flujos de pared limitada debido a los requisitos de alta resolución y los tiempos de cálculo.

Detached Eddy Simulation Model

En un intento por mejorar las capacidades predictivas de los modelos de turbulencia en regiones altamente separadas. Los ejemplos típicos de simulaciones DES son:

- Flujo alrededor de obstáculos no aerodinámicos (edificios, puentes, etc.)
- Flujo alrededor de vehículos de transporte terrestre con regiones separadas masivamente (automóviles, trenes, camiones)
- Flujo alrededor de obstáculos generadores de ruido (espejo lateral del automóvil, etc.)
- Flujo masivamente separado alrededor de alas estancadas

DES no permite el uso de condiciones de simetría, ya que las estructuras turbulentas generalmente no son simétricas. Las simulaciones bidimensionales y axisimétricas no son factibles, ya que las estructuras turbulentas siempre son tridimensionales. Por lo tanto, debe sopesar cuidadosamente la necesidad de información adicional con los recursos requeridos.

Buoyancy Turbulence

Es una opción para modelar la flotabilidad.

3.1.4. Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto. De hecho la transferencia

de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre la atenuación en el vacío. De esta manera llega a la Tierra la energía del Sol. En nuestro estudio es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica [7].

La ecuación para la intensidad de la radiación, [8]:

$$\frac{dl_\lambda}{ds} = \varepsilon \cdot l_{b\lambda} - (k_a + k_s) \cdot l_\lambda + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} l_\lambda(\hat{S}_i) \cdot \Phi_\lambda(\hat{S}_i, \hat{S}) \cdot d\Omega_i$$

donde:

- k_a Coeficiente de absorción espectral;
- k_s Coeficiente de dispersión;
- ε Emisividad espectral;
- $l_{b\lambda}$ Es la función de Planck, describe la intensidad de irradiación de cuerpo negro;
- l_λ Intensidad de la radiación espectral que depende de la posición (r) y dirección (s);
- Φ_λ Función dispersión de fase;
- Ω Ángulo sólido.

La resolución de esta ecuación integro-diferencial de primer orden para l_λ en dirección s, es muy costosa computacionalmente. Para resolverla existen muchos modelos de radiación que proporcionan la solución aproximada [8]. Entre los modelos de radiación más usados están:

Modelo Rosseland [8]

- *Descripción:* Supone que los medios son ópticamente gruesos y que energía radiante emitida desde otros lugares en el dominio se absorbe rápidamente y no tienen influencia en el transporte local. Esto implica que la aproximación no es válida cerca de las paredes. La aproximación Rosseland es muy cómoda de usar ya que no resuelve ecuaciones de transporte adicionales.
- *Método:* a la ecuación de energía se añade un término de difusión.

- *Limitaciones:* sólo es válido para el material anisotrópico ópticamente grueso y de forma lineal (grosor / profundidad mayor de 10). Cerca de las paredes no es válida
- *Beneficios:* no requiere condiciones de frontera ya que las superficies se tratan como negro (emisividad = 1.0)
- *Ejemplos:* Transferencia de calor a través del vidrio en caliente. Transferencia de calor a través del material semitransparente

Modelo P1 [8]

- *Descripción:* se resuelve una ecuación de transporte adicional.
- *Hipótesis:* Intensidad de radiación es isotrópica o la dirección es independiente de la posición en el espacio.
- *Método:* a la ecuación de energía se añade un término de difusión.
- *Limitaciones:* Sólo es válido para el espesor óptico/ profundidad mayor que 1. No es válido para las paredes transparentes. Las necesidades de condiciones de contorno en todas las superficies externas
- *Beneficios:* Válido para las superficies no-negro, las propiedades no constantes, la dispersión anisotrópica, y cerca de las paredes
- *Ejemplos:* las llamas de combustible pulverizado (en las regiones fuera de las inmediaciones de la llama).

Modelo Monte Carlo [8]

- *Descripción:* Simula los procesos subyacentes que gobiernan en el sistema de interés, es decir, las interacciones físicas entre los fotones y su entorno. Un fotón es seleccionado desde una fuente de fotones y seguido a través del sistema hasta que cruza la frontera de la región analizada (la superficie S) o se impacta con las partículas materiales del medio. Cada vez que el fotón experimenta un *evento*, por ejemplo, la dispersión (en este caso el fotón continúa el movimiento en nueva dirección y con nueva energía) o la absorción (en este caso el *evento* se termina), las cantidades físicas de interés son actualizadas. Este proceso genera una *historia* de los fotones en el sistema. Muchas historias de fotones deben ser generadas para

obtener buenas estimaciones de las cantidades físicas de interés en un sistema. Las fuentes de fotones son seleccionadas, de una *muestra* de la base de radiación emitida.

- *Limitaciones*: Siempre contiene estadísticas de error.
- *Beneficios*: Método de propósito general - le permite hacer gris / no color gris, la emisión, dispersión y absorción. Es la opción recomendada para un cálculo de la radiación en medios transparentes

Modelo de Transferencia Discreta [8]

- *Descripción*: Según este modelo, las superficies que forman el dominio son divididas en elementos de superficie desde los cuales se lanza un conjunto de haces discretos de rayos cubriendo todo el ángulo sólido hemisférico. El camino a lo largo de un rayo se discretiza en secciones. La ecuación de transferencia de calor por radiación se integra analíticamente a lo largo de longitudes espaciales discretas dentro de las cuales se considera que las fuentes de radiación son constantes. Esta integral debe repetirse hasta que el rayo alcanza una superficie opuesta del contorno del dominio. Las cantidades físicas en cada elemento se supone que son uniformes. Estos rayos tienen que ser rastreados a través del dominio de la misma manera que el seguimiento de los fotones en el modelo de Monte Carlo. Por lo tanto, la descripción del modelo de Monte Carlo y de transferencia discreta es el mismo. Hipótesis: La dispersión es isotrópica.
- *Método*: Caminos de fotones desde las superficies de frontera se determinan al comienzo de la carrera. Con este método (isotrópico supuesto de dispersión), la intensidad se resuelve a lo largo de los rayos. Suponiendo un sistema isotrópico, la solución se extiende a todo el dominio donde la absorción, emisión y dispersión puede ser resueltos.
- *Limitaciones*: falta de información de error es computacionalmente muy caro cuando hay demasiadas superficies para rastrear los rayos.
- *Beneficios*: Los modelos no grises son tratados por el tratamiento de cada banda como un cálculo por separado. Mejor calidad de la solución de P1 y Rosseland Modelos, sobre todo cuando hay regiones ópticamente delgadas en el dominio.

3.1.5. Procedimiento de análisis de problemas de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Para resolver los problemas de dinámica de fluidos mediante software no es suficiente aprender las herramientas del programa a utilizar, es necesario realizar el análisis de resultados para asegurarse de que son coherentes. Antes de hacer el análisis de comportamiento de sistemas que involucran flujo de fluidos primero se define el dominio de interés, que debe tener la forma más simple posible, prescindiendo de elementos que no influyen en el comportamiento del flujo, y si el comportamiento es simétrico se puede utilizar esta condición para trabajar sólo con una parte del sistema, lo que disminuye considerablemente el tiempo de análisis y recursos utilizados por el ordenador. Por la misma razón también hay que analizar la posibilidad de reducir el problema tri-dimensional a uno bi-dimensional para realizar la generación de la malla apropiada. Hay que tomar en cuenta que el mallado no adecuado puede reflejarse en los resultados. Posteriormente se selecciona el modelo matemático y las condiciones de frontera o (y) condiciones iniciales. Se configuran los criterios para la resolución del modelo, por ejemplo el error deseado, el número máximo de iteraciones, etc. Por último se realiza el análisis de resultados y su validación. La validación puede realizarse mediante el cálculo analítico o experimentalmente. ANSYS tiene la posibilidad de resolver los problemas de dinámica de fluidos mediante los paquetes FLUENT y CFX. Los ejemplos de uso de estos paquetes se presentarán a continuación.

3.1.6. Problema 3: Comportamiento térmico aplicando Ansys Fluent

La biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, cuenta con 8 cubículos destinados para trabajar en grupos. Como uno de ellos es el más propenso a elevadas temperaturas por su ubicación dentro del edificio, se tiene la necesidad de realizar el estudio del comportamiento térmico, considerando principalmente el calentamiento que se da a través de la radiación solar.

Las dimensiones del cubículo son de $5.3 \times 2.9 \times 3.2$ m, además está compuesto por cuatro paredes de concreto, tres ventanas de vidrio, una puerta de madera, cielo raso de yeso (Gypsum) y piso de baldosa.

Para este análisis se utilizará el modulo Fluent de Ansys.

Procedimiento de análisis en Ansys Fluent

1. Dentro del entorno **Workbench** seleccionar **Fluid Flow (Fluent)** de los sistemas de análisis y arrastrarlo al esquema del proyecto (figura 3.1).

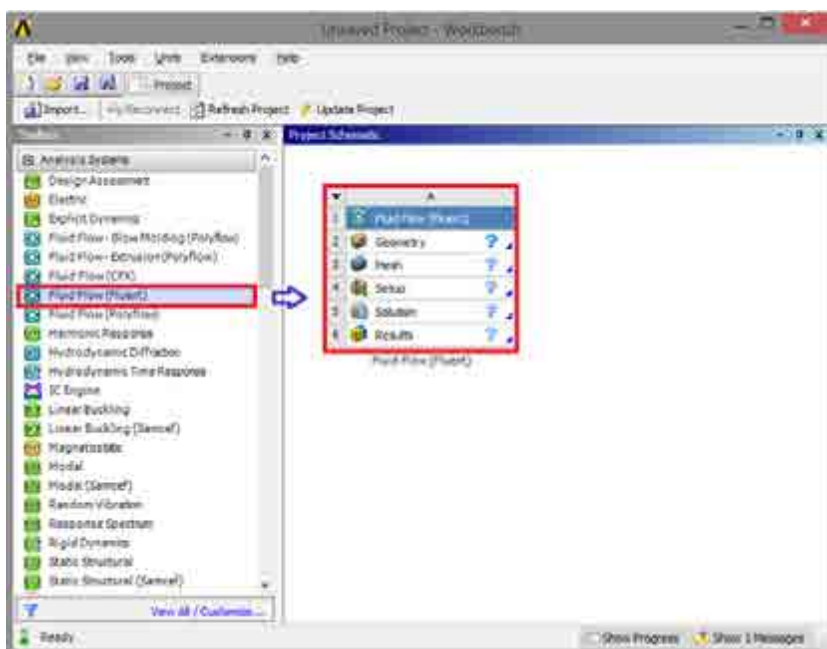


Figura 3.1

- Hacer clic derecho en la opción **Geometry**, seleccionar **Import Geometry**, buscar la ruta en **Browse** y seleccionar el archivo con el nombre **Cubiculo.igs** que se encontrara en el CD adjunto al libro, que contiene la geometría a analizar (figuras 3.2 y 3.3).

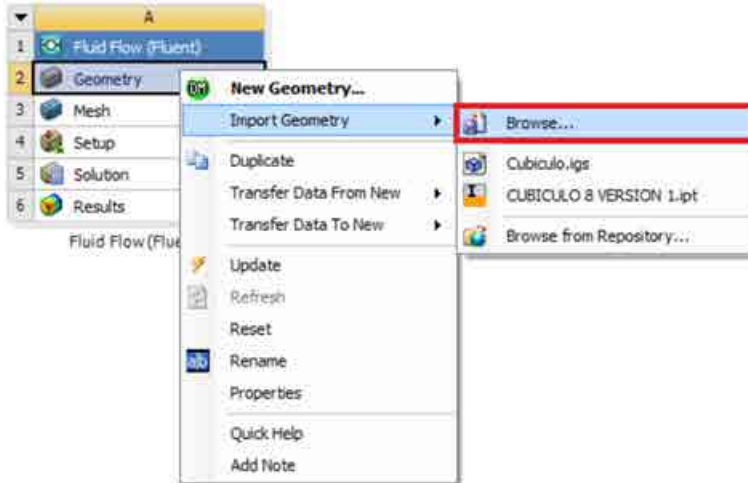


Figura 3.2

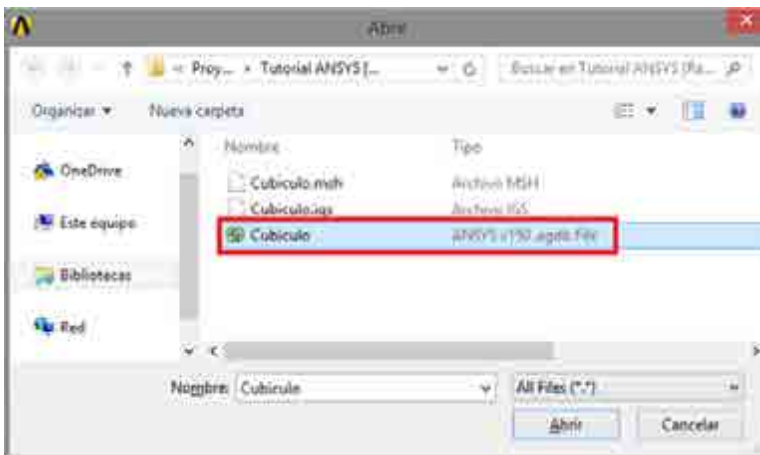



Figura 3.3

3. Hacer clic en generar geometría () para su visualización (figura 3.4). Cerrar esta interfaz y proceder con el mallado que se indica en el siguiente paso.

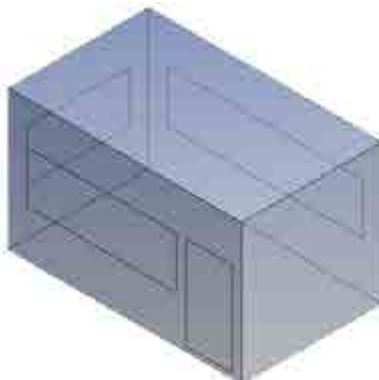


Figura 3.4

4. Hacer clic derecho en la opción **Mesh**, y luego Edit (figura 3.5).

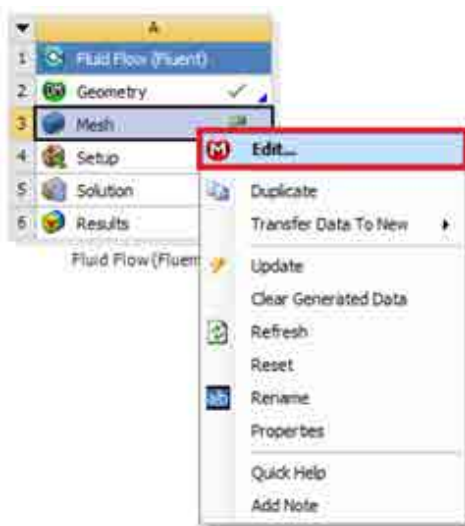


Figura 3.5

- Hacer clic en la opción **Mesh**, elegir **Sizing** y en **Relevance Center** seleccionar el tipo de mallado **Medium** (figura 3.6).

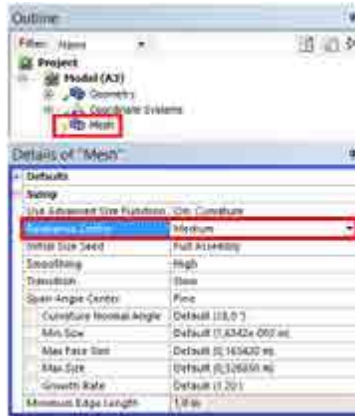


Figura 3.6

Nota: Si se requiere mayor precisión en la obtención de resultados, se sugiere elegir el tipo de mallado fino.

- Hacer clic en Generar malla (⚡ **Generate Mesh**) y cerrar la interfaz de Mesh, luego hacer clic derecho nuevamente sobre la opción Mesh y colocar actualizar Update. Estos pasos permiten guardar las configuraciones antes realizadas (figura 3.7).

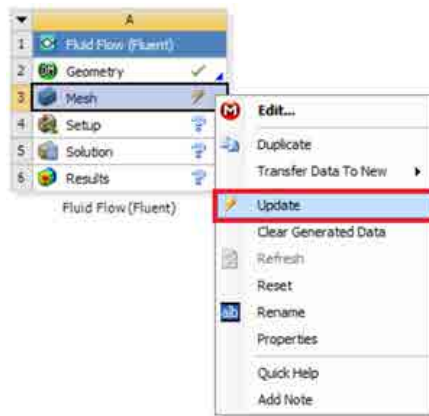


Figura 3.7

7. Para empezar con la configuración inicial del análisis; hacer click derecho sobre **Setup** y posteriormente seleccionar **Edit** (figura 3.8).



Figura 3.8

8. Configurar todas las variables a considerarse en la transferencia de calor por radiación en el cubículo. Para ello seleccionar Setup de la lista inicial del Fluid Flow, escoger la dimensión en 3D y configurar las demás propiedades como se muestra a continuación y finalizar haciendo clic en **OK** (figura 3.9).

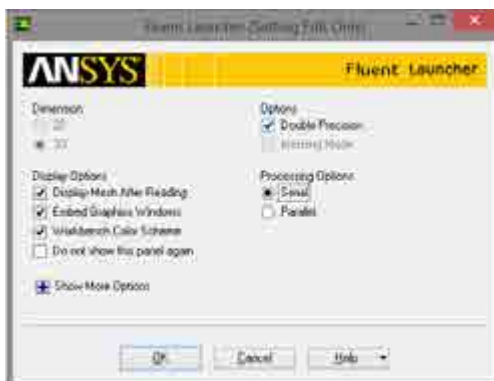


Figura 3.9

9. Seleccionar el régimen transitorio (**Transient**). Además, introducir el valor de **-9.81 m/s²** en la aceleración gravitacional sobre el eje Y (figura 3.10).

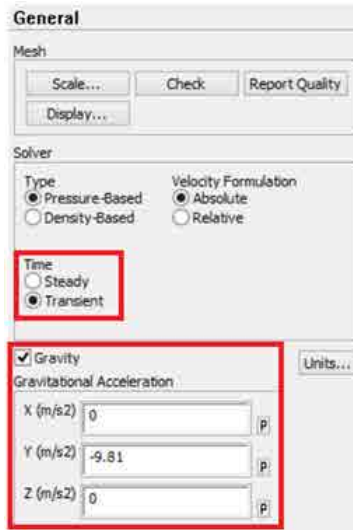


Figura 3.10

10. En la opción **Models** activar la ecuación de energía (figura 3.11).

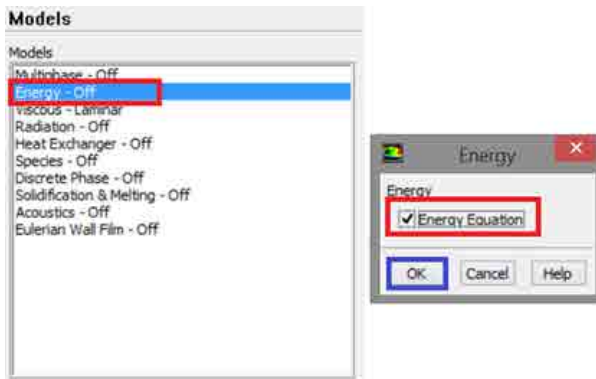


Figura 3.11

13. Seleccionar Solar Calculator e introducir el día y la hora en el cual se quiere conocer el comportamiento térmico del cubículo, además colocar la posición global del cubículo (figura 3.14).

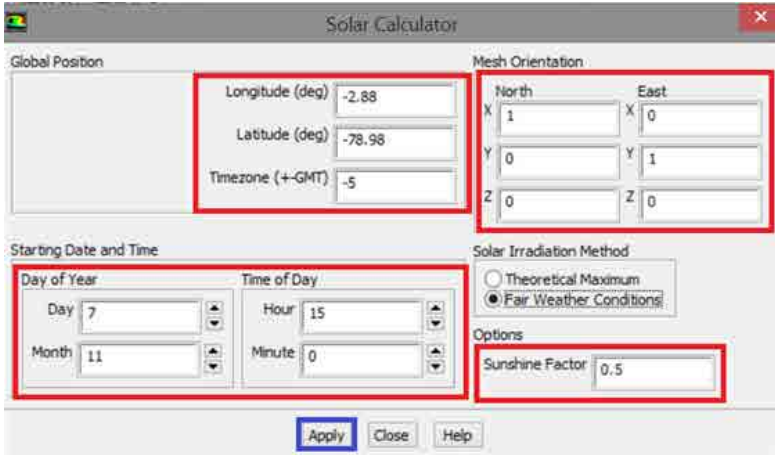


Figura 3.14

Nota: La longitud, latitud y la zona horaria se obtuvieron mediante **Google Maps**, esta variará dependiendo de la ubicación geográfica en el que se encuentre el recinto a analizar.

14. Crear y asignar las propiedades de los distintos materiales de las paredes, techo y piso del cubículo. El programa permite elegir entre materiales sólidos y fluidos; por defecto los materiales proporcionados por el programa son aire y aluminio, al segundo material se debe cambiar las propiedades por las del vidrio, madera, concreto, etc.

Para éste caso realizar la configuración de las propiedades de la puerta que es de madera, haciendo click en el material (**Aluminum**) y seleccionando (**Change/Edit**); a continuación colocar los valores de las propiedades de cada material y luego hacer click en (**Change/Create**).

A la pregunta si deseamos sobrescribir el material de aluminio, seleccionar (Si), para los siguientes materiales escoger la opción (No) a su sobre-escritura, y para finalizar hacer click en (Close) (figura 3.15).

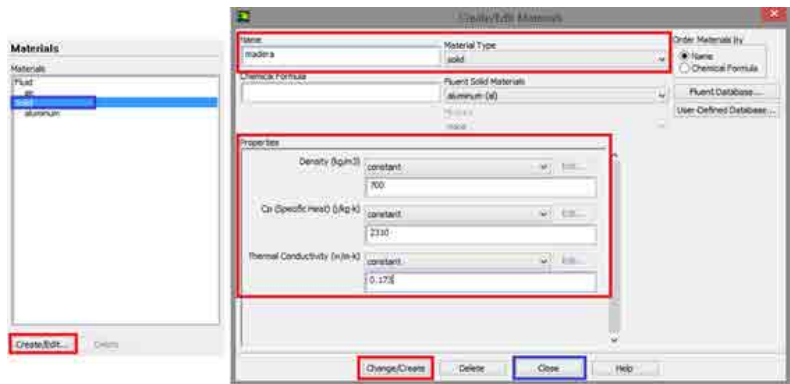


Figura 3.15

15. Repetir el procedimiento anterior para cada material del cubículo; a continuación se muestra los materiales y sus propiedades las cuales se usa para este análisis (tabla 3.2).

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m·K)
Vidrio	2800	750	0.7
Madera	700	2310	0.173
Concreto	2320	1138	0.54
Yeso	1800	837	0.81
Aire	1.225	1006.43	0.0242

Tabla 3.2. Propiedades térmicas de los materiales. [6]

16. Establecer las condiciones de frontera del cubículo, seleccionando la opción **fluid**, para especificar que dentro del cubículo se encuentra fluido, seguido a esto hacer click en **Edit** (figura 3.16).



Figura 3.16

17. En la siguiente interfaz, seleccionar **air** (aire), en el espacio **Zone Name** asignar el nombre **interior - cubículo** y las otras propiedades dejar por defecto (figura 3.17).



Figura 3.17

18. Configurar la temperatura, emisividad y otras propiedades de cada material, seleccionando **Boundary Conditions** y luego especificar la zona, en este caso eligiendo **cieloraso**; escoger **Wall** en la opción **Type** y activar la casilla **Highlight Zone**. Por último seleccionar **Edit-Thermal-Convection**, aquí colocamos las condiciones térmicas como: coeficiente de transferencia de calor, temperatura, emisividad y el espesor de la pared (figura 3.18).

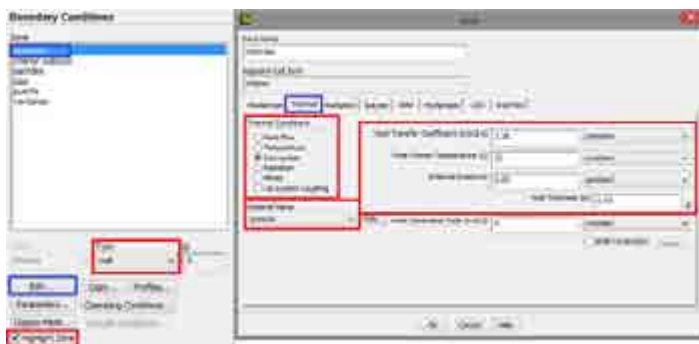


Figura 3.18

19. Luego hacer click en **Radiation** y en la opción **Bc Type** seleccionar **opaque** y desactivar la casilla **Participates in solar Ray Tracing** (figura 3.19).

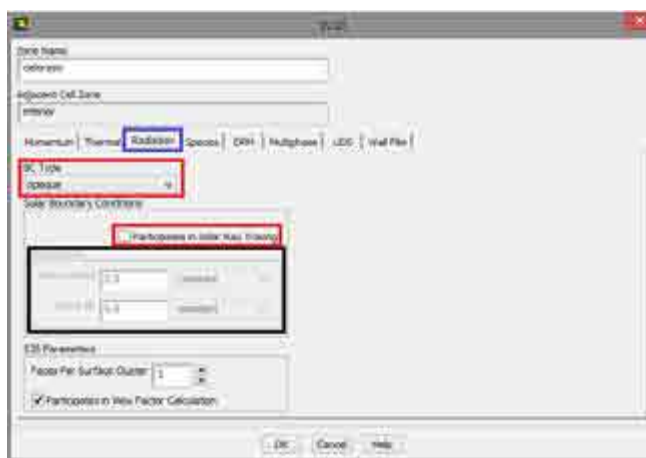


Figura 3.19

20. Configurar las zonas restantes colocando los valores correspondientes a paredes, piso, puerta, ventana, etc., de forma similar a lo antes explicado, utilizando los datos referenciales de las Tablas 3.3 y 3.4.

Zona	Thermal Conditions	Heat Transfer Material Name	Free Stream Coefficient ($\text{w}/\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}$)	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Internal	Wall (m)
Cielo raso	convection	yeso	3,27	22	0,93	0,1
Piso	convection	concreto	3,18	22	0,85	0,25
Paredes	convection	concreto	3,18	22	0,85	0,15
Puerta	convection	madera	0,315	22	0,91	0,08
Ventanas	convection	vidrio	58,81	22	0,86	0,01

Tabla 3.3. Condiciones térmicas. [11]

Zona	BC Type	Participates In solar ray Tracing	Absorptivity Direct Visible	Absorptivity Direct ir	Transmissivity Direct Visible	Transmissivity Direct ir
Cielo r.	Opaque	OFF	—	—	—	—
Piso	Opaque	ON	0.65	0.65	—	—
Paredes	Opaque	ON	0.65	0.65	—	—
Puerta	Opaque	ON	0.59	0.59	—	—
ventanas	Semi trans.	ON	0.15	0.15	0.88	0.88

Tabla 3.4. Condiciones de radiación. [11]

21. Indicar la forma en la que ANSYS resolverá nuestro problema. Para esto hacer click en **Solution Initialization**, activar las opciones **Standard Initialization**, **Relative to Cell Zone**, además seleccionar **all-zones** de la opción **Compute from**. A la temperatura de inicio asignar 22°C (temperatura ambiente).

A continuación dar click en **Initialize** (figura 3.20).



Figura 3.20

22. Hacer click en **Calculation Activities** y asignar el valor de 1 en **Time Steps**, para guardar los resultados para cada paso de tiempo (figura 3.21).



Figura 3.21

23. Configurar la cantidad de resultados con el paso de tiempo. Para esto seleccionar **Calculation Activities** y asignar el valor de 300 en la opción

Time Step Size y 24 en la opción **Number of Time Steps**, y para finalizar realizar click en **Calculate** (figura 3.22).



Figura 3.22

24. Al aparecer el mensaje **Calculation complete** cuando finalice el cálculo, dar click en **Ok** y cerrar el **SetUp** del Fluent (figura 3.23).

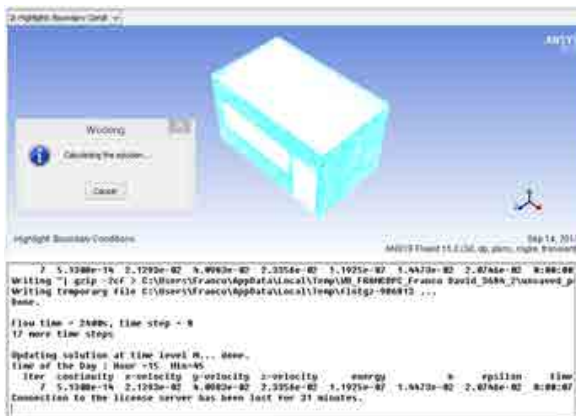


Figura 3.23

25. Para visualizar los resultados, hacer click derecho sobre **Results** y seleccionar **Edit** (figura 3.24).

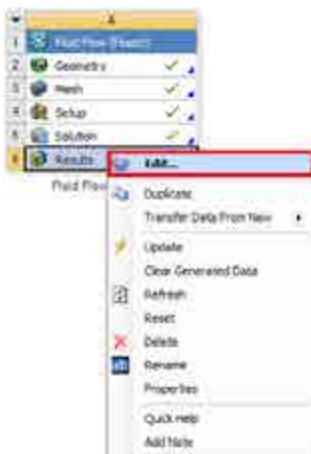


Figura 3.24

26. Para observar la variación de la temperatura en cualquier punto del dominio hacer click en **Location**, y al desplegar la lista de opciones de localización seleccionar **Point** (figura 3.25).



Figura 3.25

27. Asignar el nombre “**PUNTO CENTRAL**” y presionar **OK** (figura 3.26).

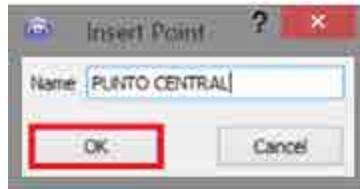


Figura 3.26

28. Configurar la ubicación del punto, haciendo click en **PUNTO CENTRAL** para abrir interfaz con los detalles de dicho punto; seleccionar **Geometry** y en el apartado **Domains** escoger **All Domains**, en **Method** seleccionamos **XYZ** y colocamos los valores de las coordenadas de la ubicación del punto. Las pestañas como **Color**, **Symbol**, etc. sirven para configurar color y forma del punto (figura 3.27).

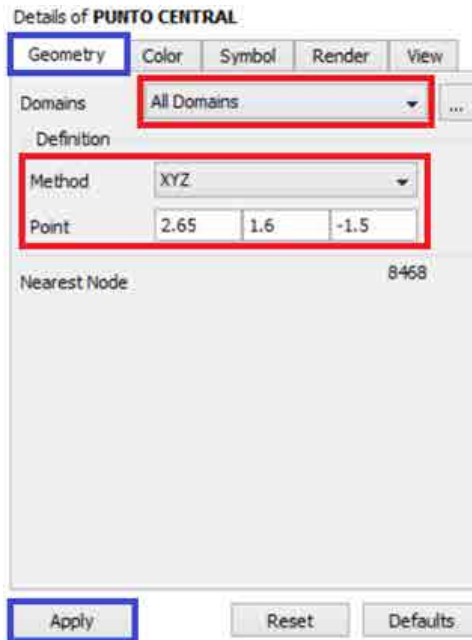


Figura 3.27

29. Para visualizar el comportamiento térmico mediante un gráfico, de la barra de herramientas seleccionar **Chart**, asignar el nombre **TEMP PUNTO CENTRAL** y presionar (OK) (figura 3.28).

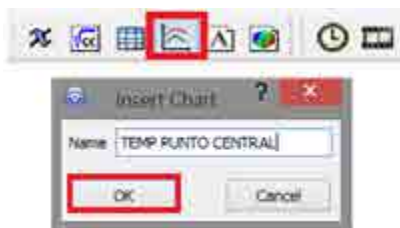


Figura 3.28

30. Al abrirse la interfaz seleccionar **General** y activar las casillas **XY-Transient or Sequence** y en **Display Title** asignar un nombre a la gráfica (figura 3.29).

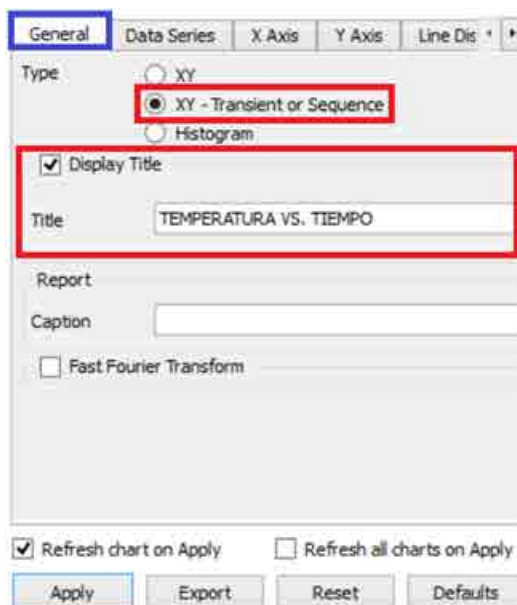


Figura 3.29

31. Seleccionar **Data Series** y en la opción **Location** seleccionar el **PUNTO CENTRAL** creado anteriormente, además asignar un nombre a la línea de tendencia, en este caso la llamaremos **TEMP** (figura 3.30).

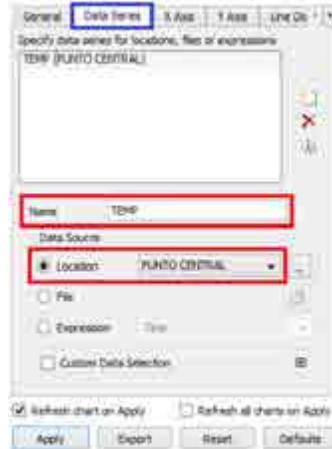


Figura 3.30

32. En la pestaña **X-Axis**, seleccionar **Determine ranges automatically**, **Determine the number format automatically**, **Use data for axis labels** y en la opción **Expression** asignar **Time** (figura 3.31).

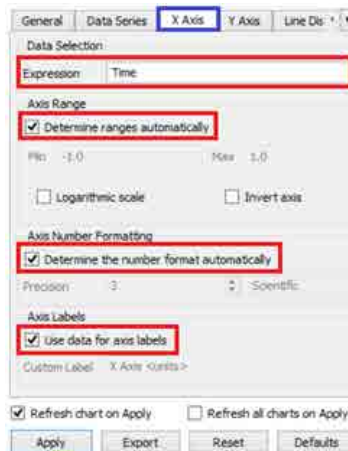


Figura 3.31

33. En la pestaña **Y-Axis** seleccionar las opciones **Determine ranges automatically**, **Determine the number format automatically**, **Use data for axis labels**, en el casillero **Variable** elegir **Temperature** (figura 3.32).



Figura 3.32

Nota: Las demás pestañas de configuración se dejan por defecto.

34. Finalizada la configuración anterior hacer click en **Apply** y a continuación obtendremos la gráfica que nos indica el comportamiento térmico en el centro del cubículo (figura 3.33).

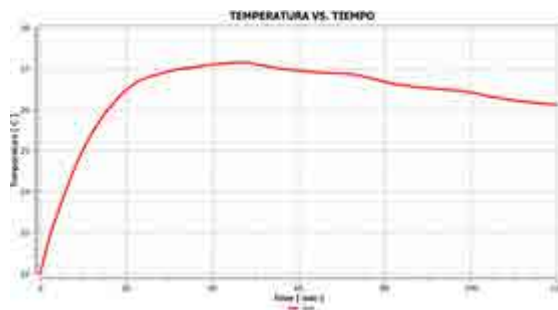


Figura 3.33

35. Para visualizar el comportamiento térmico dentro del cubículo mediante curvas de nivel, hacer click en Contour y asignar el nombre **PAREDES** (figura 3.34).

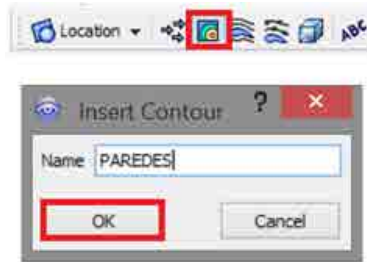


Figura 3.34

36. Al finalizar el paso anterior se abre la interfaz **Details of PAREDES** dentro de la cual realizar las siguientes configuraciones: en **Geometry** seleccionar las opciones **All domains**, **Temperature**, **Local**. En la opción Locations seleccionar **paredes, piso, puerta, ventanas** excepto **cielo raso** esto para tener una mejor visualización. Por último seleccionar las opciones **Linear**, **Default (Rainbow)** de las opciones **Color Scale** y **Color Map** respectivamente (figura 3.35).

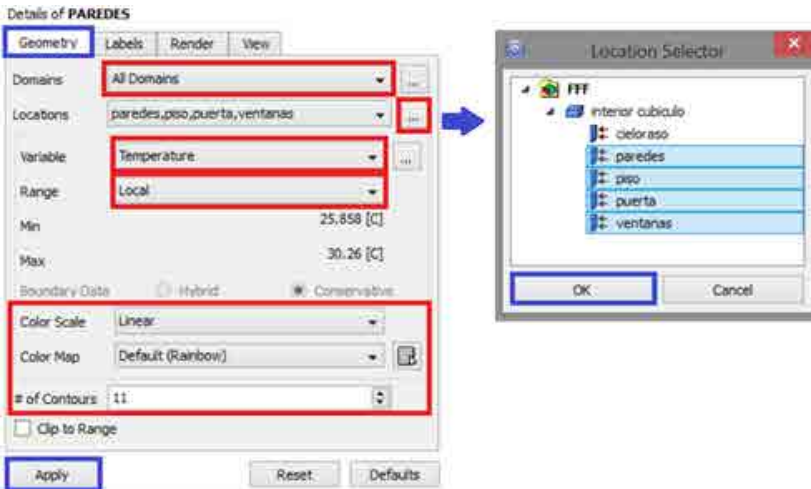


Figura 3.35

37. Al terminar las configuraciones anteriores hacer click en **Apply** y se visualizará el siguiente resultado (figura 3.36).

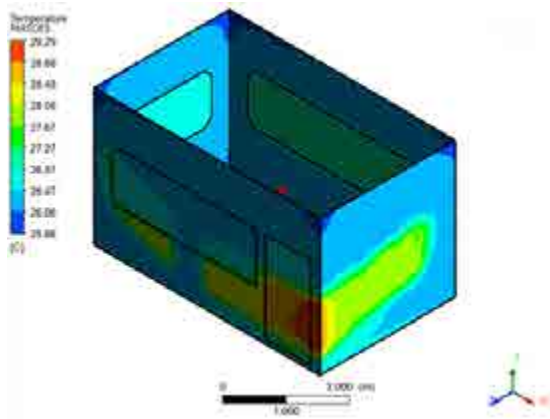


Figura 3.36

3.1.7. Validación de resultados

La siguiente gráfica muestra la comparación realizada entre los resultados de la simulación y los resultados obtenidos experimentalmente (figura 3.37).

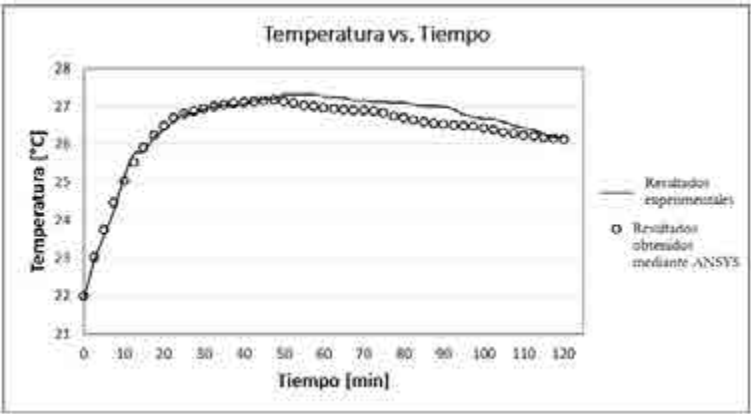


Figura 3.37

3.1.8. Problema 4: Comportamiento térmico

En el ejemplo planteado se simulará el comportamiento térmico interno de un furgón frigorífico, para el cual se consideran parámetros importantes para el análisis, tales como: datos de temperatura del ambiente, dimensiones, materiales de construcción, velocidad de entrada del fluido refrigerado y datos de temperatura vs tiempo, tomados de forma experimental, con el fin de corroborar los resultados computacionales obtenidos.

Se pretende analizar la estabilización de la temperatura interna en el furgón y el tiempo que transcurre para que esto suceda [11].

Descripción del problema

Se tiene un furgón frigorífico designado al transporte de alimentos, que tiene un equipo de refrigeración **Thermal Master F 1400**, con un rango de operación de 23°C hasta -14°C . Las dimensiones del furgón se observan en la Tabla 3.5.

Largo	Alto	Ancho	Espesor de pared
3.12 m	1.62 m	1.7 m	52 mm

Tabla 3.5. Dimensiones furgón frigorífico.

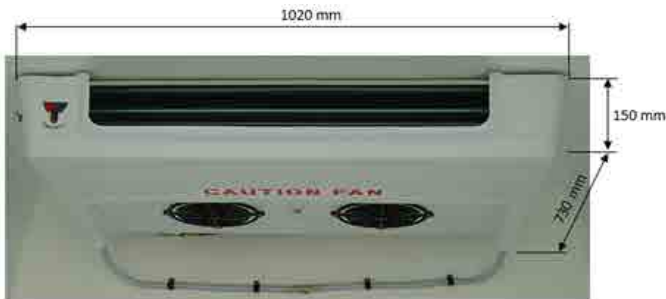


Figura 3.38. Dimensiones del evaporador

Procedimiento de análisis en Ansys CFX

1. Seleccionar el tipo de análisis **CFX**, que será utilizado para este caso (figura 3.39).

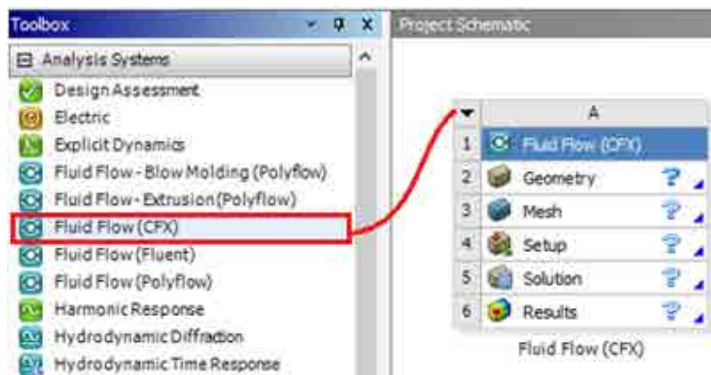


Figura 3.39

2. Dar click derecho sobre **Geometry**, para cargar el archivo que se encuentra en el CD adjunto al libro con el nombre de **Furgon.igs** (figura 3.40).

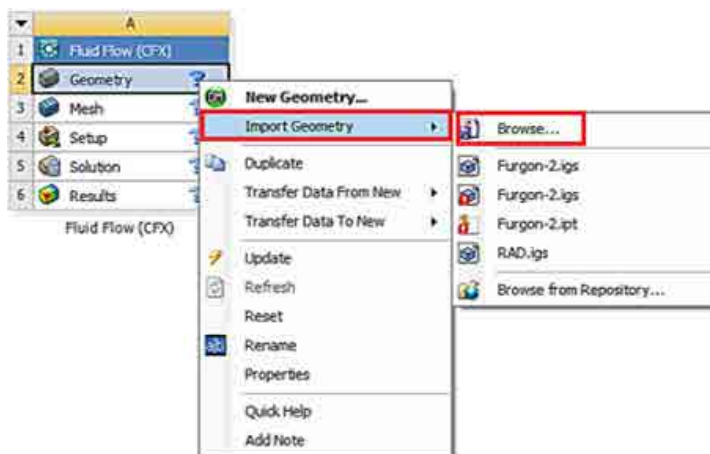


Figura 3.40

- Una vez importada la geometría, hacer click derecho sobre **Import-Generate** (figura 3.41).

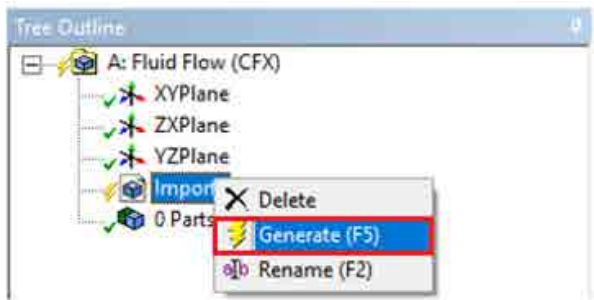


Figura 3.41

- Dentro de la interfaz Geometry, proceder a la selección de las partes del furgón y asignación de nombres respectivos para su futura identificación, donde se aplicarán las condiciones de borde. Para esto seleccionar la parte del elemento, dando click derecho en la ventana en la cual se encuentra la geometría y escoger la opción Named Selection (figura 3.42).

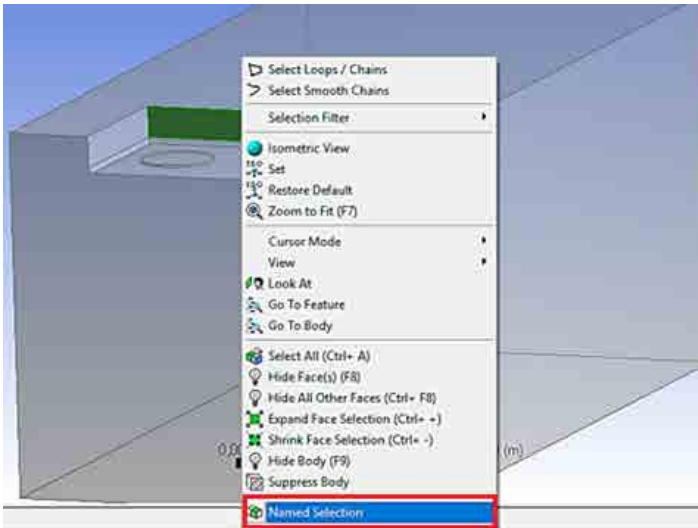


Figura 3.42

5. Luego editar el nombre de identificación asignando a las regiones correspondientes los siguientes nombres: Entrada, Salida, Laterales, Compuerta, Techo, Piso y dar click en **Generate** en cada una de ellas (figura 3.43).



Figura 3.43

6. Luego de este proceso, al seleccionar un nombre en el Tree Outline se marcará de color verde la región correspondiente en la geometría (figura 3.44).

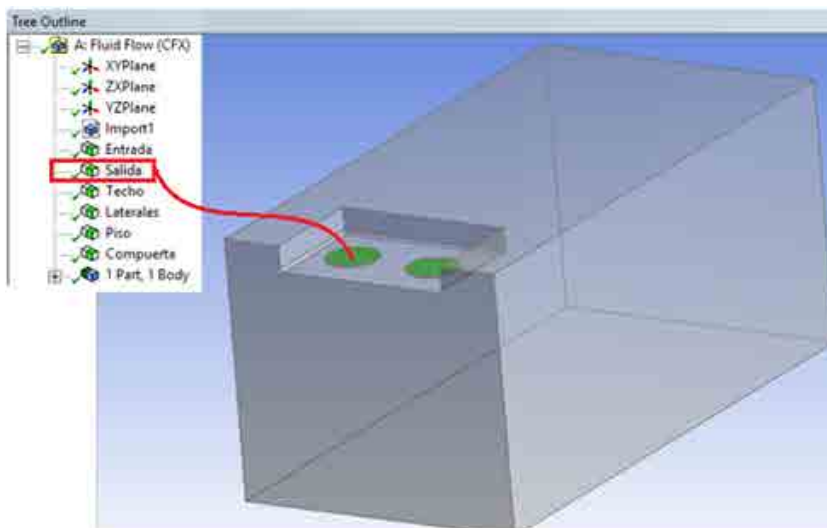


Figura 3.44

7. Cerrar la interfaz **Geometry** y dar doble click en la opción **Mesh** (figura 3.45).

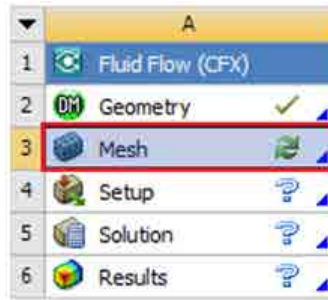


Figura 3.45

8. Para el mallado podemos elegir diferentes opciones, para esto, dar click derecho en **Mesh-Insert-Method** (figura 3.46).

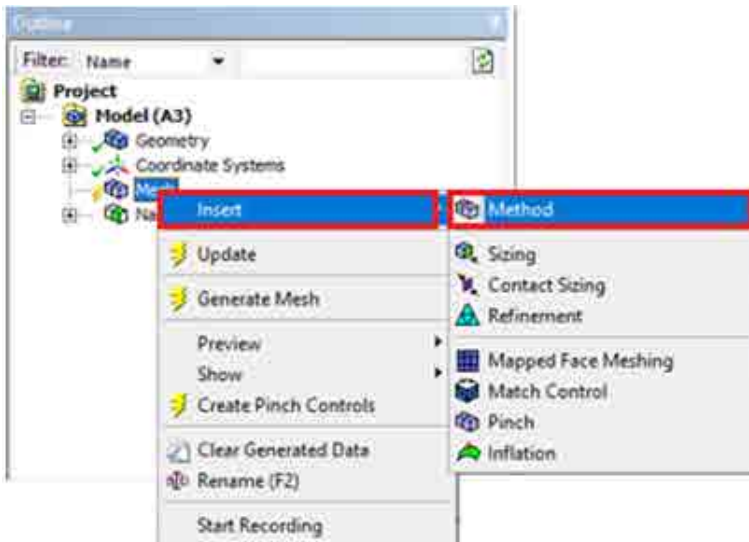


Figura 3.46

9. Para insertar un método, seleccionar el elemento, que se pintará de color verde, y dar click en **Apply**, como siguiente paso en **Method**

escoger la opción **Hex Dominant** (figura 3.47).

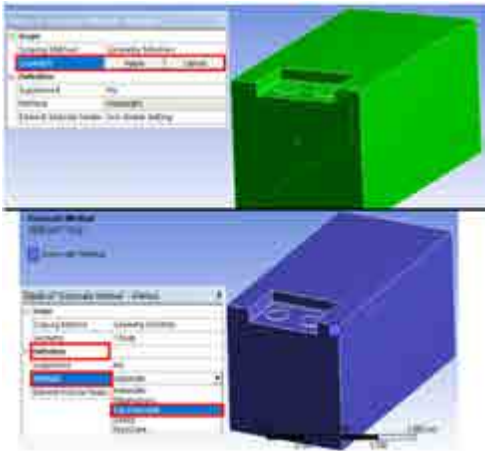


Figura 3.47

10. En el caso de no insertar un método de mallado, se puede usar una malla por defecto, la cual se puede refinar con el fin de obtener mejores resultados (figura 3.48).

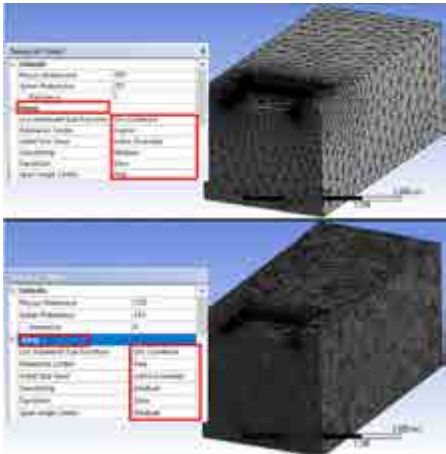


Figura 3.48

11. Como paso final de mallado, dar click en **Generate Mesh**, luego dar click en **Update** y cerrar la interfaz **Mesh**.
12. Ingresar a la opción **Setup**, verificando que las opciones anteriores estén actualizadas correctamente (figura 3.49).



Figura 3.49

13. Configurar el tipo de análisis que vamos a realizar, para ello dar click derecho en **Analysis Type-Edit**, e ingresar los siguientes datos (figura 3.50).

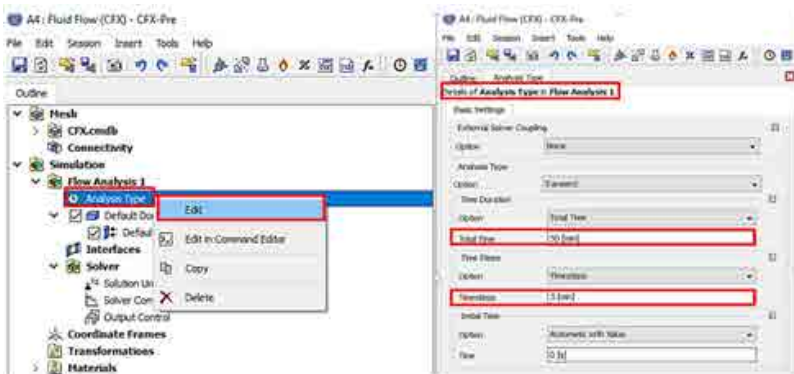


Figura 3.50

14. Como el dominio de análisis es fluido compuesto de aire y agua, es necesario crear un nuevo material dando click derecho en **Materials-Insert-Material**, y nombrarlo como **Mezcla**. Luego en **Details of Mezcla** realizar las configuraciones según la figura 3.51.

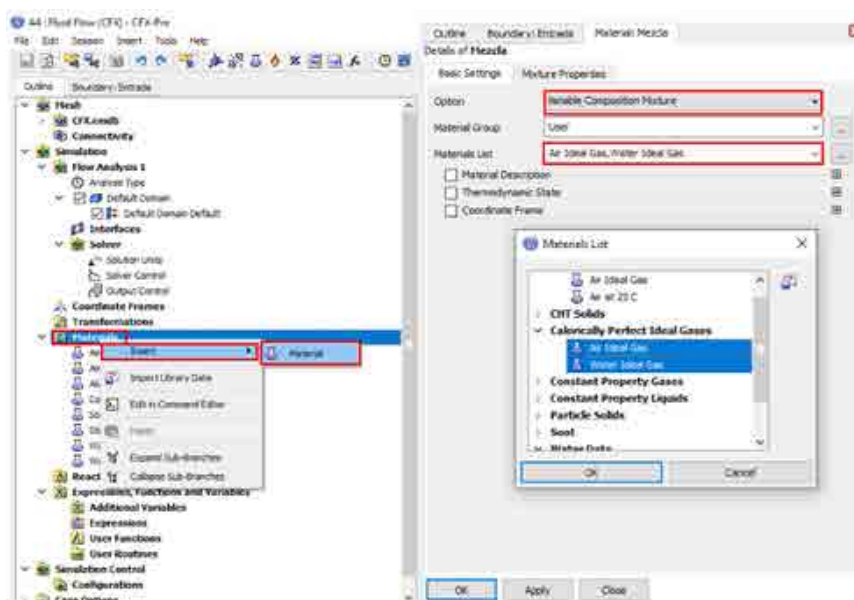


Figura 3.51

15. El comportamiento de temperatura en la entrada al furgón es una función de tiempo, con los datos experimentales, se encontró una función que relaciona la temperatura y el tiempo:

$$T = 11,95 \cdot \exp(-0,001058 \cdot t) + 11,58 \cdot \exp(-0,01036 \cdot t)$$

Para ingresar esta función como condición de borde dar click derecho en **Expressions-Insert-Expression**. Para crear la función de entrada, denominada Temp, se debe manejar cada término como

una constante que almacena una expresión matemática (figura 3.52).

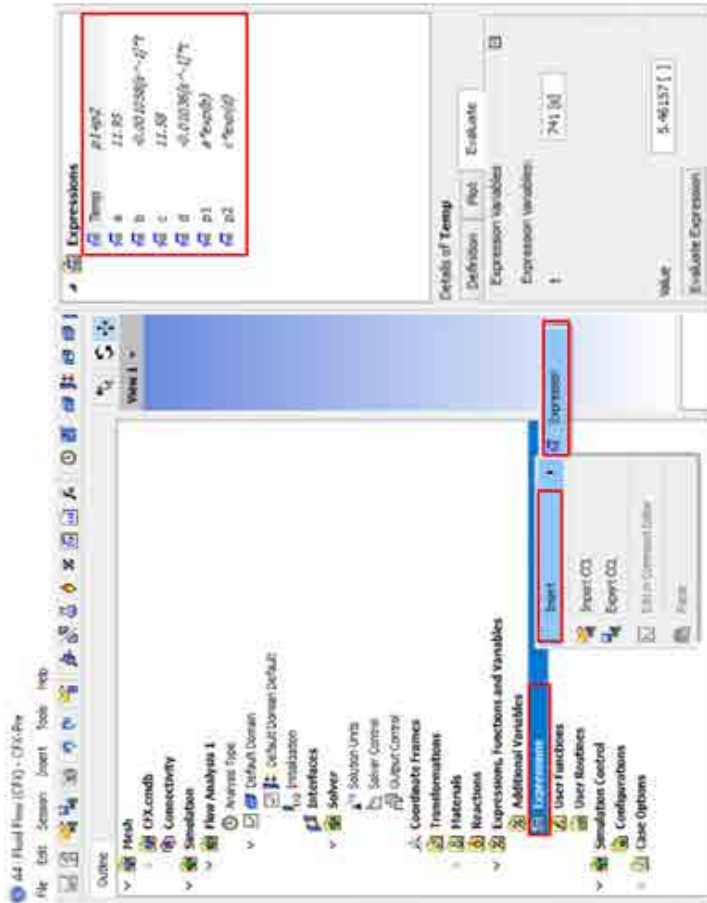


Figura 3.52

16. Para almacenar los datos de salida ingresar a la opción **Output Control**. Dentro de esta interfaz ingresar a **Trn Results** y seleccionar **add new ítem** la cual abrirá una ventana, que permitirá ingresar el nombre de la tabla donde se almacenarán los datos calculados (figura 3.53).

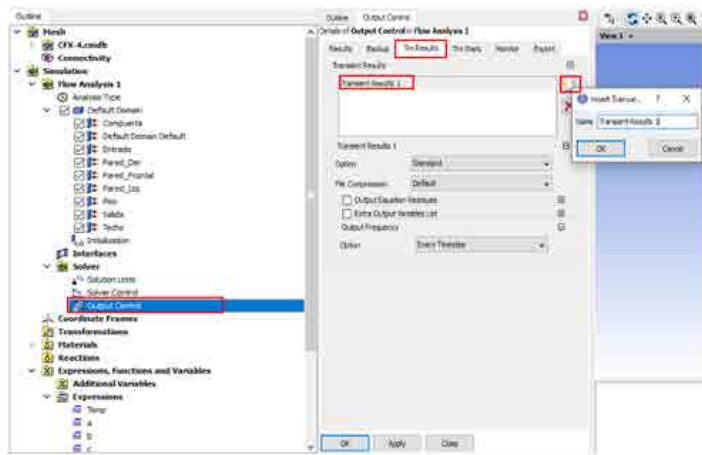


Figura 3.53

17. Para definir el dominio de análisis hacer click derecho en **Default Domain-Edit** ir a la pestaña **Basic Settings** y realizar la configuración según la figura 3.54.

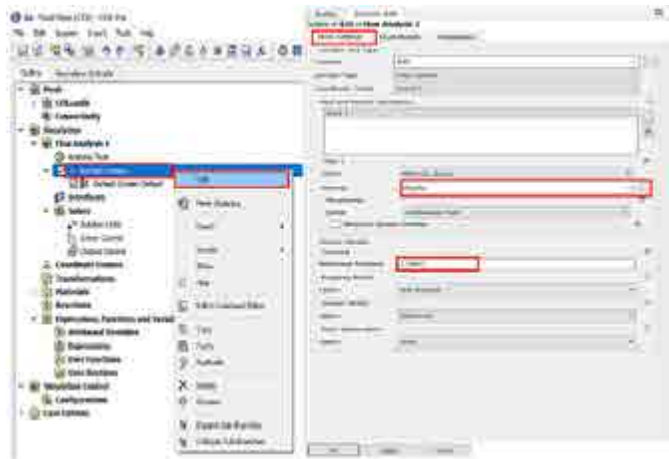


Figura 3.54

18. Luego ir a las pestañas **Fluid Models** e **Initialization** y configurar el modelo matemático a utilizar y los datos de inicialización

como se muestra en la figura 3.55.

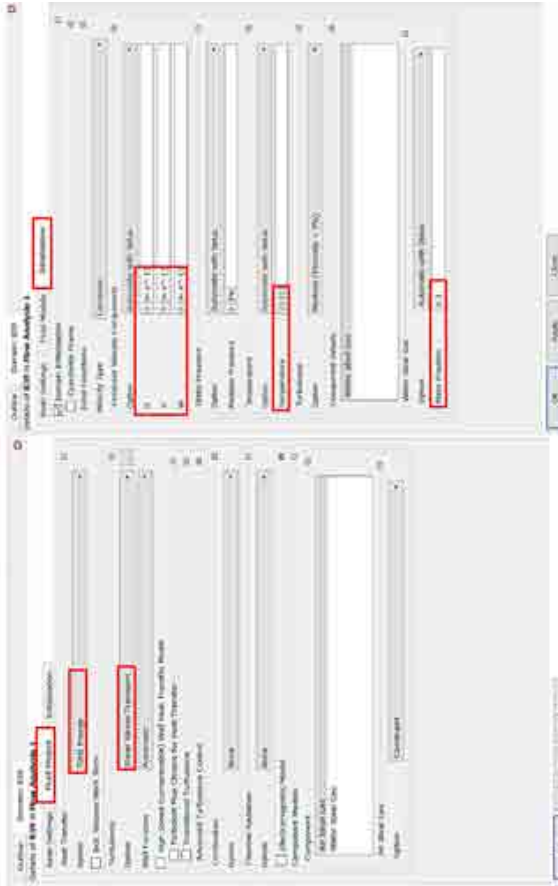


Figura 3.55

19. Para ingresar las condiciones de borde en cada región dar click derecho en **Default Domain-Insert-Boundary** y en la ventana **Insert Boundary** y colocar el nombre de la región exactamente igual a la asignación que se hizo en la interfaz **Geometry** (figura 3.56).

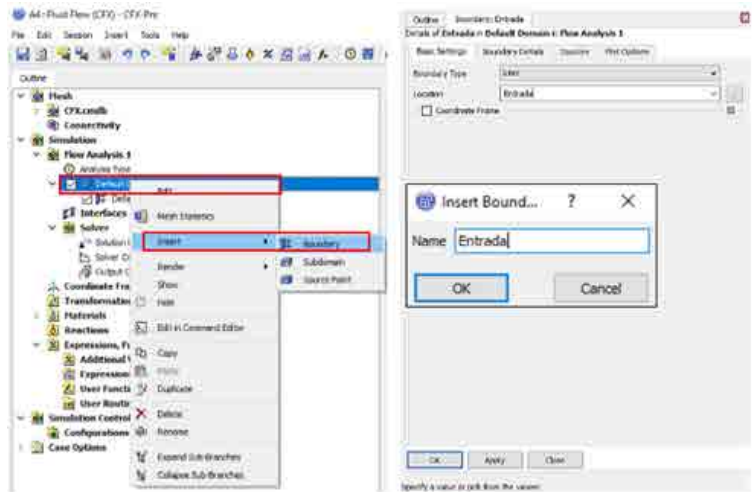



Figura 3.56

20. Luego en Boundary Details, que la denominamos Entrada, ingresar la velocidad de flujo, fracción de masa y la función de temperatura en la opción de Heat Transfer, para esto pulsar el botón  y escoger la función denominada Temp (figura 3.57).

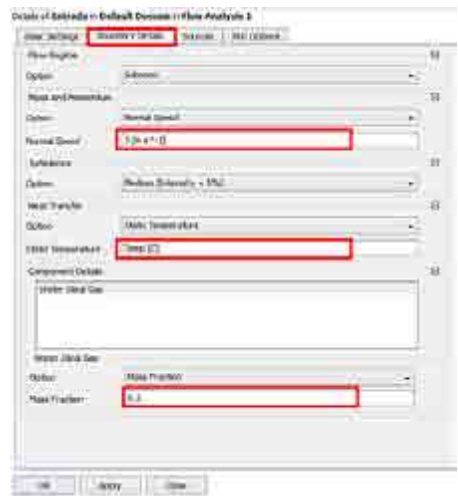


Figura 3.57

21. De la misma forma configurar la salida (figura 3.58).

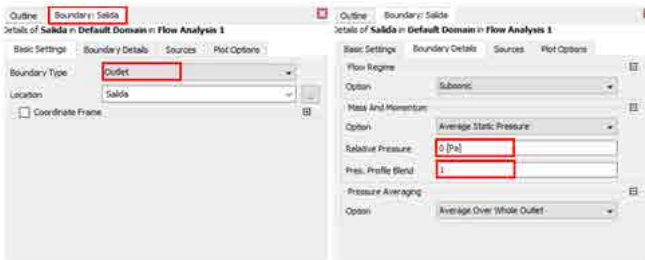


Figura 3.58

22. Configurar las condiciones de las paredes (figura 3.59).

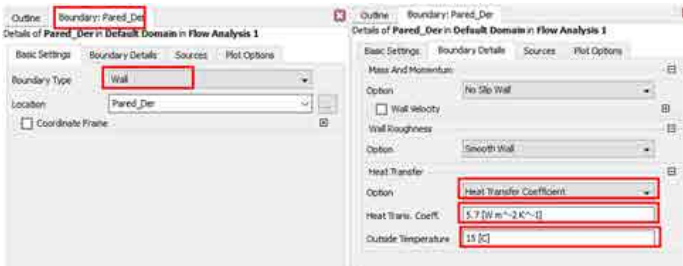


Figura 3.59

23. Cerrar la interfaz **Setup**.

24. Dar doble click en la opción **Solution** (figura 3.60).



Figura 3.60

25. Se abre una ventana la cual dar click en **Start Run** (figura 3.61).

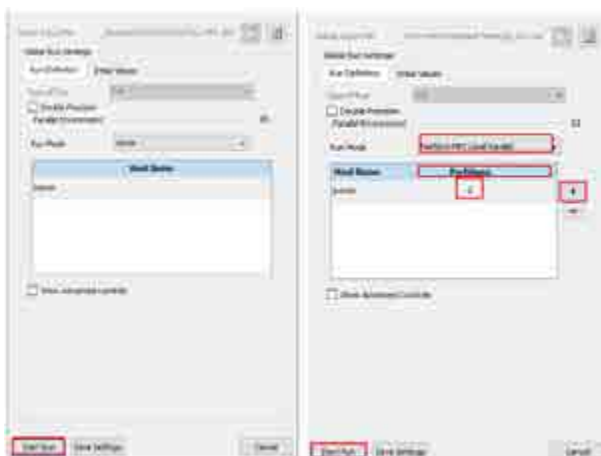


Figura 3.61

26. Para la ubicación de puntos de análisis de variación de temperatura ir a **Location-Point** e insertar cuatro puntos, uno por uno, mediante colocación de sus coordenadas XYZ (figura 3.62).

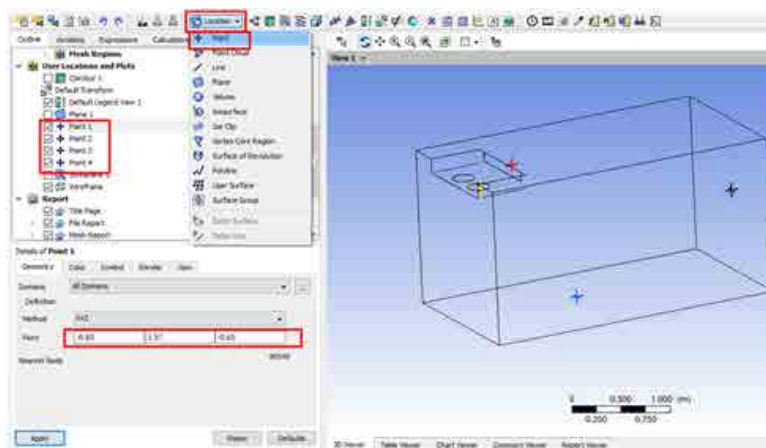


Figura 3.62

27. Para graficar los resultados ir a **Chart** y dar click en **OK**, (figura 3.63).



Figura 3.63

28. Una vez creado el **Chart 1**, dar doble click en él, para abrir la ventana **Details of Chart 1** donde hay que realizar las configuraciones según las figuras 3.64 y 3.65.

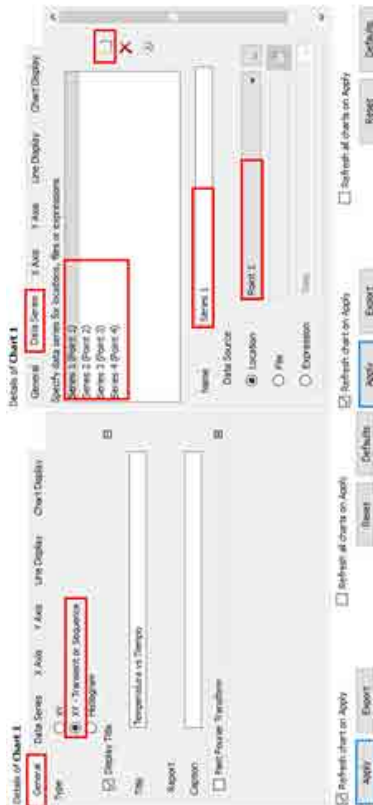


Figura 3.64

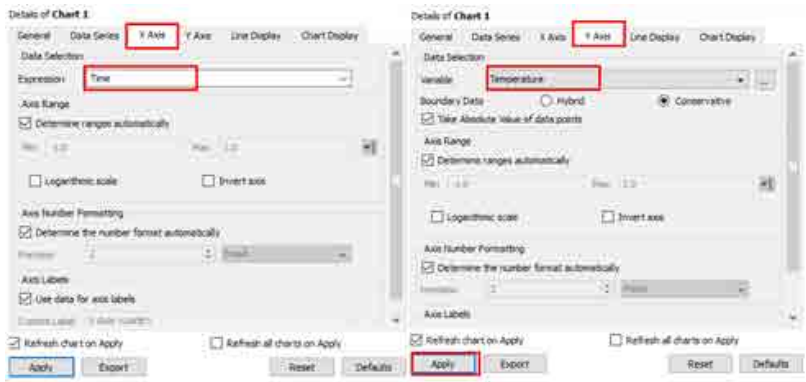


Figura 3.65

3.1.9. Resultados

1. Generar la gráfica de resultados seleccionados para cada punto creado (figura 3.66).

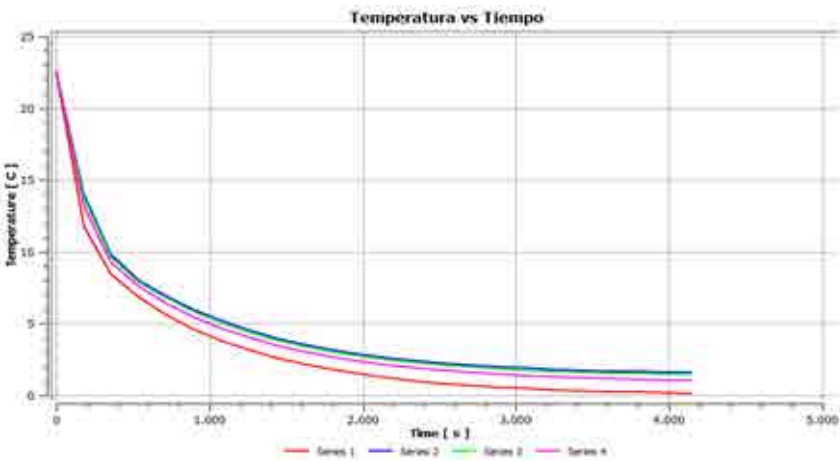


Figura 3.66

2. Comparar los resultados experimentales y de simulación en Ansys (figura 3.67).

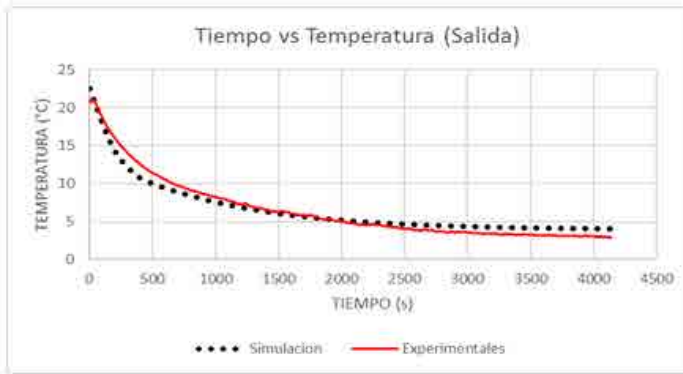
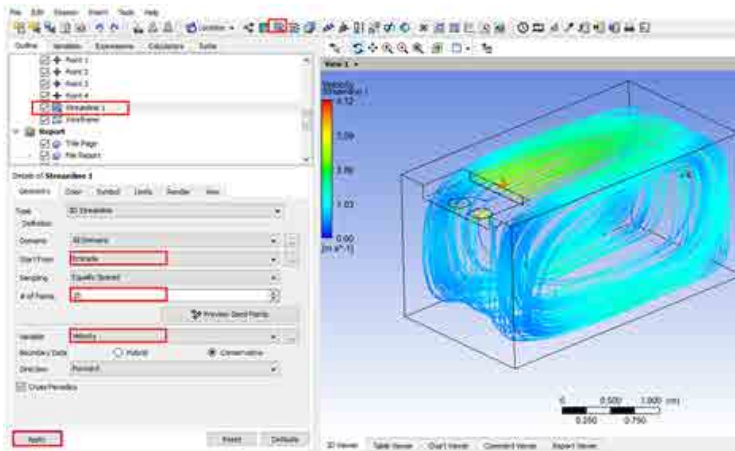


Figura 3.67

3. Generar líneas de flujo agregando un Streamline desde la barra de herramientas y realizar las configuraciones según la figura 3.68.



- Para visualizar el contorno de temperatura en un plano dentro del dominio dar click en **Location-Plane** y ubicarlo en la posición especificada en la figura 3.69.

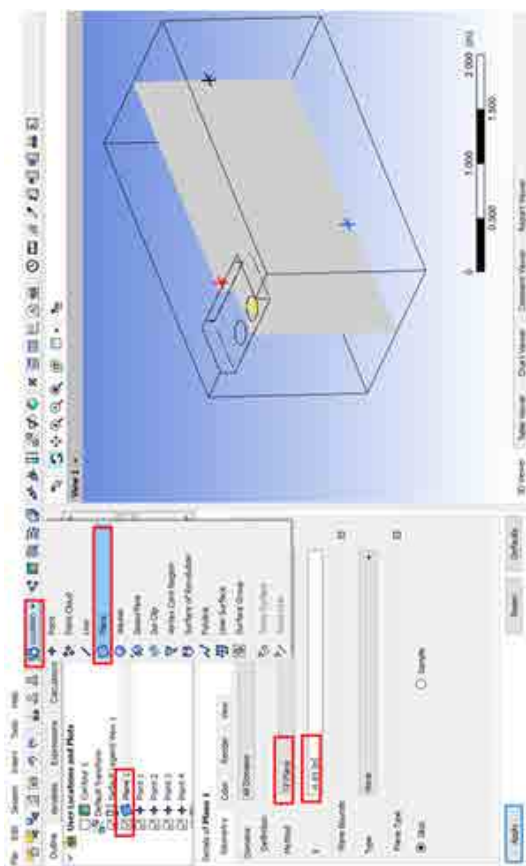


Figura 3.69

5. Luego crear el contorno dando click en **Contour** de la barra de herramientas, y en **Locations** seleccionar **Plane 1**, también configurar el tiempo en el cual deseamos ver el comportamiento de la temperatura, dando click en **Timestep Selector** de la barra de

herramientas (figura 3.70). Con esta herramienta se puede visualizar el comportamiento térmico en el plano en distintos tiempos (figuras 3.71 y 3.72).

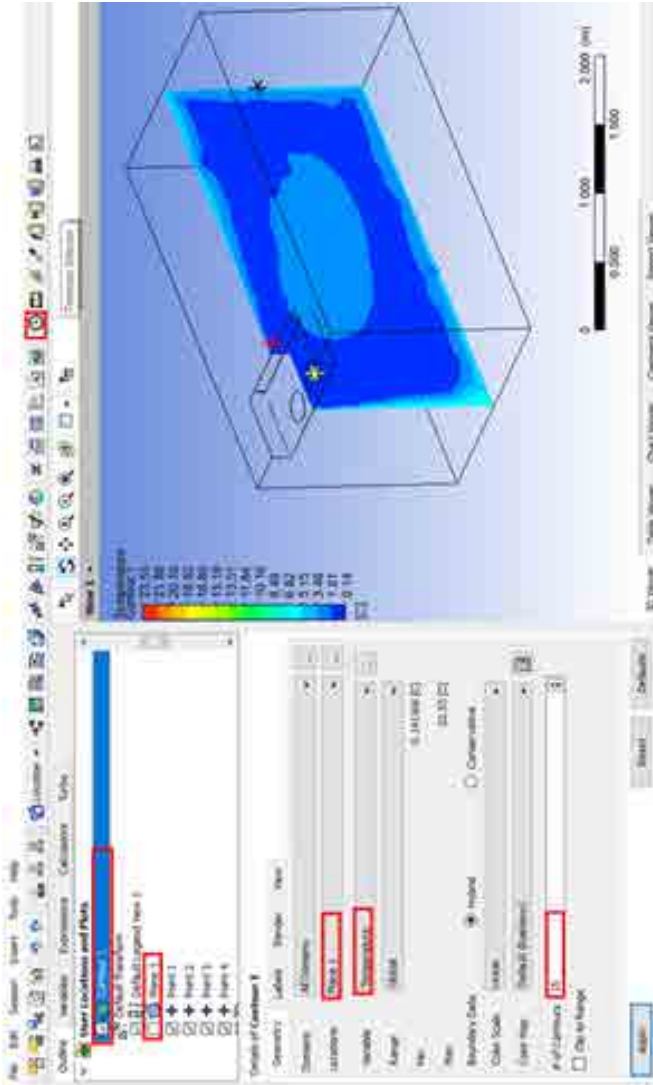
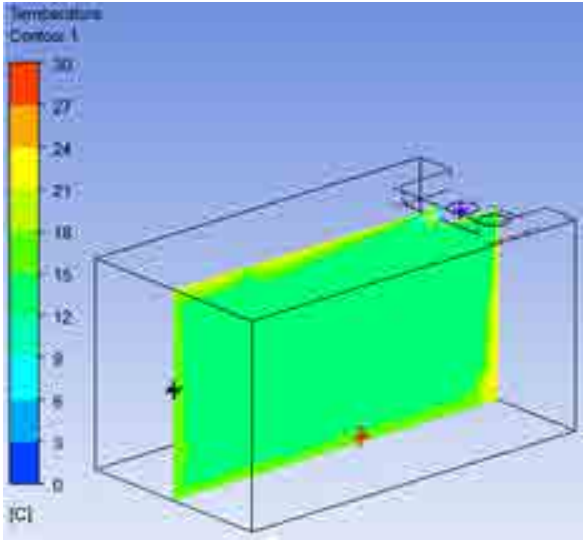


Figura 3.70

Tiempo (s)

Temperatura (°C)

180



1240

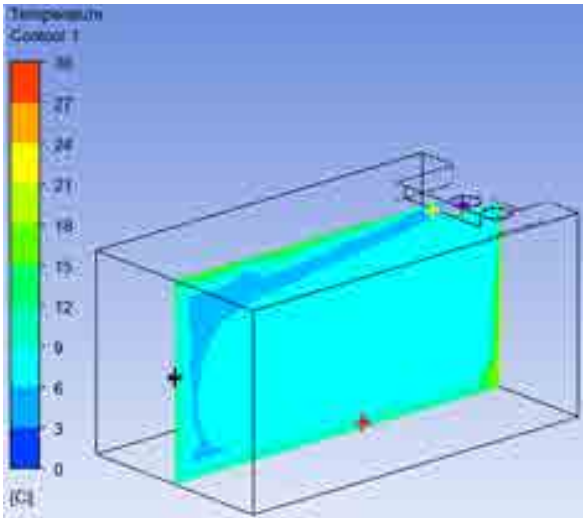
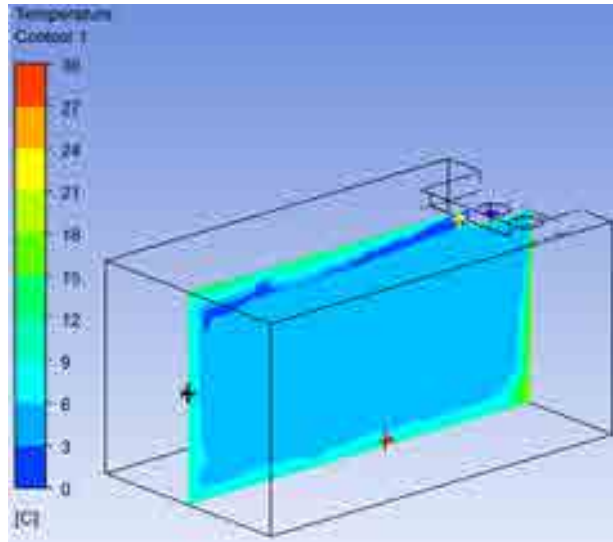


Figura 3.71. Comportamiento térmico en diferentes tiempos

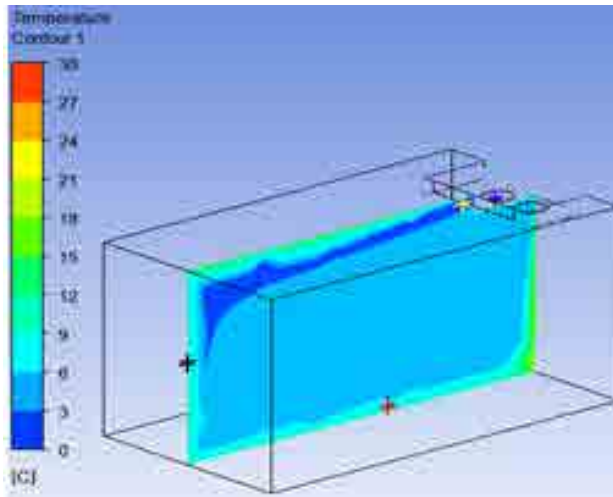
Tiempo (s)

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

2880



4140

**Figura 3.72.** Comportamiento térmico en diferentes tiempos

3.1.10. Problema 5: Análisis de fluidos

Analizar la temperatura de salida de los dos fluidos que circulan en el intercambiador de tubo y coraza mediante software **Ansys CFX**, y comparar los resultados con los realizados en el software **SolidWorks Flow Simulation** y cálculo analítico. [9]

Descripción del problema

Determinar la temperatura de salida en un intercambiador de calor de tubo y coraza de flujo paralelo. El sistema es de acero inoxidable. Hay una transferencia de calor entre el flujo del tubo interno caliente y el flujo externo frío en la coraza. El modelo 3D se presenta en la figura 3.73 y las dimensiones del intercambiador de calor se presentan en la figura 3.74.

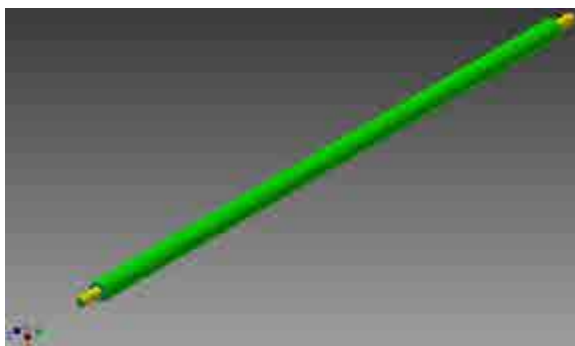


Figura 3.73



Figura 3.74

El flujo másico del agua en la coraza es de 0.8 kg/s con una temperatura de entrada de 283.2 K y el flujo másico del agua en el tubo es de 0.2 kg/s a una temperatura de entrada de 343.2 K (figura 3.75).



Figura 3.75

Procedimiento de análisis en Ansys CFX

1. Dentro del entorno de **Ansys Workbench** seleccionar el módulo **Fluid Flow CFX** y arrastrarlo al **Project Schematic**. Cambiar el nombre por Intercambiador de calor (figura 3.76).

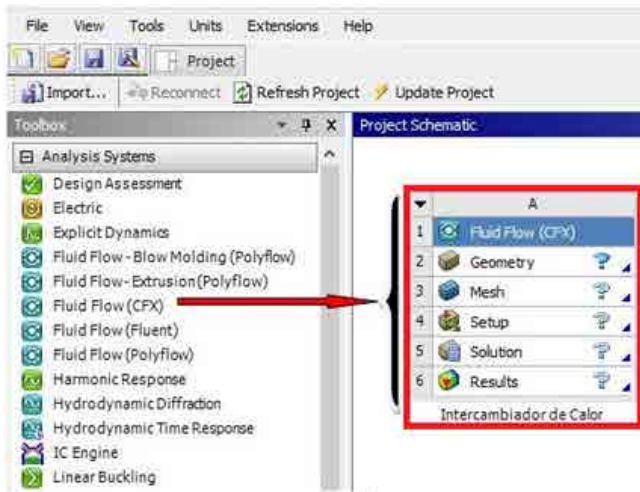


Figura 3.76

2. Hacer doble clic en **Geometry**, enseguida se abrirá la interfaz del **Design Modeler** (figura 3.77).

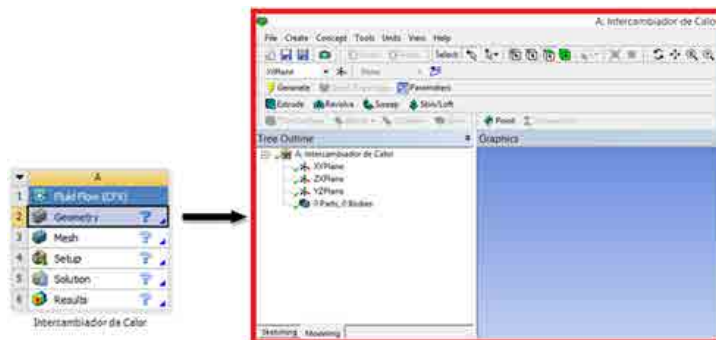


Figura 3.77

3. Importar la geometría del CD adjunto. Para esto ir a la barra de herramientas superior del entorno **Design Modeler**, y hacer click en **File-Import External Geometry File** (figura 3.78).

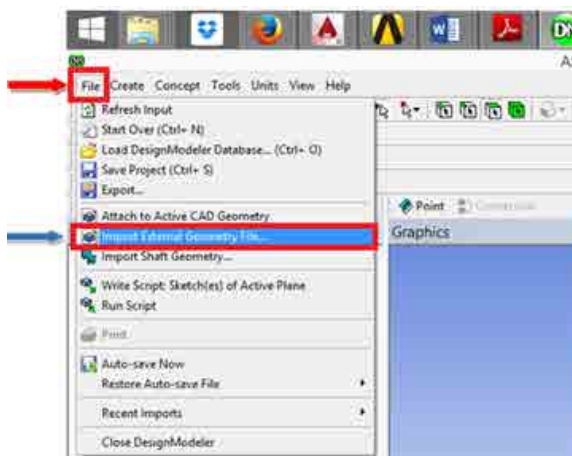


Figura 3.78

4. Seleccionar el archivo con el nombre **Intercambiador3.igs** que viene en el disco adjunto al libro y dar click en **Abrir** (figura 3.79).

Para visualizar la geometría importada dar click en **Generate** (figura 3.80).

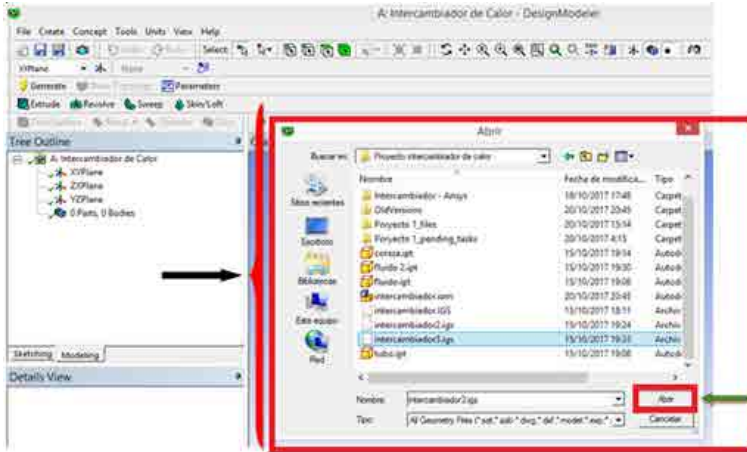


Figura 3.79

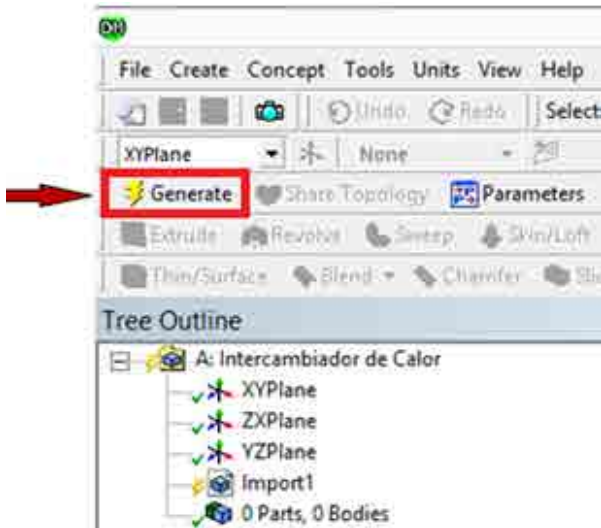


Figura 3.80

5. La geometría aparece en la ventana **Graphics** (figura 3.81).

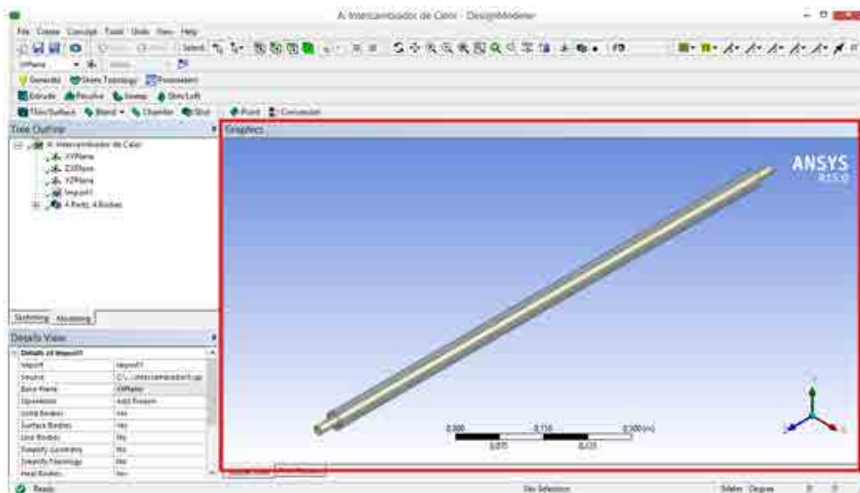


Figura 3.81


6. Ir al **Tree Outline** y dar click izquierdo en  **4 Parts, 4 Bodies** para observar los cuerpos que conforman el intercambiador (figura 3.82).



Figura 3.82

7. Los cuatro cuerpos están nombrados por defecto como **solid** (figura 3.83).



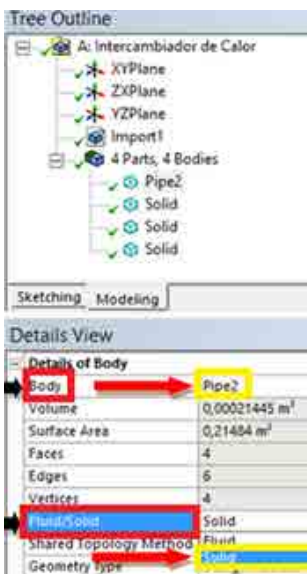
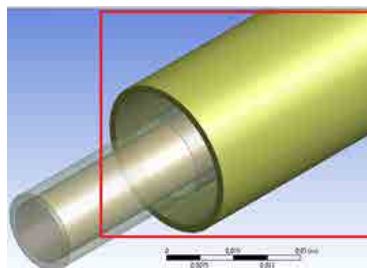
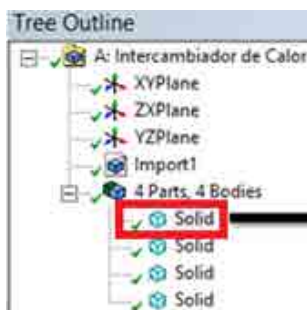
Figura 3.83

8. Cambiar los nombres de los cuerpos, y asignar el tipo de dominio **Fluid/Solid** (Tabla 3.6).

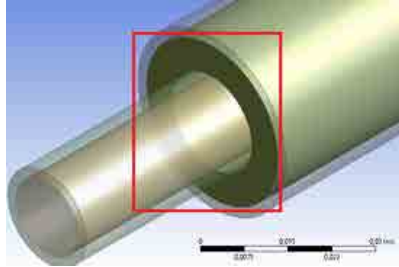
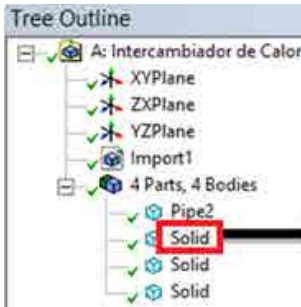
Body	Fluid/Solid
Pipe2	Solid
Agua10	Fluid
Pipe1	Solid
Agua70	Fluid

Tabla 3.6

9. Para esto seleccionar cada parte del intercambiador dando click en **Solid** y cambiar el nombre. Para identificar qué geometría corresponde a cada nombre, al marcar **Solid** en **Tree Outline** la misma se pintará de color amarillo en la ventana **Graphics** (figura 3.84).

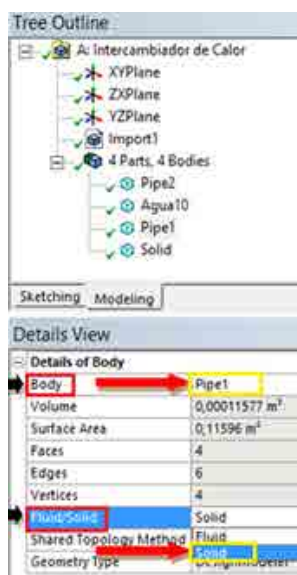
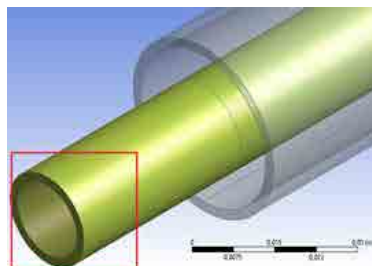


En la parte de **Details View**, dirigirse a **Body** y cambiar el nombre por **Pipe2**, como se puede ver la geometría corresponde a la tubería externa (coraza del intercambiador). A continuación dirigirse a **Fluid/Solid** y seleccionar como dominio **Solid**

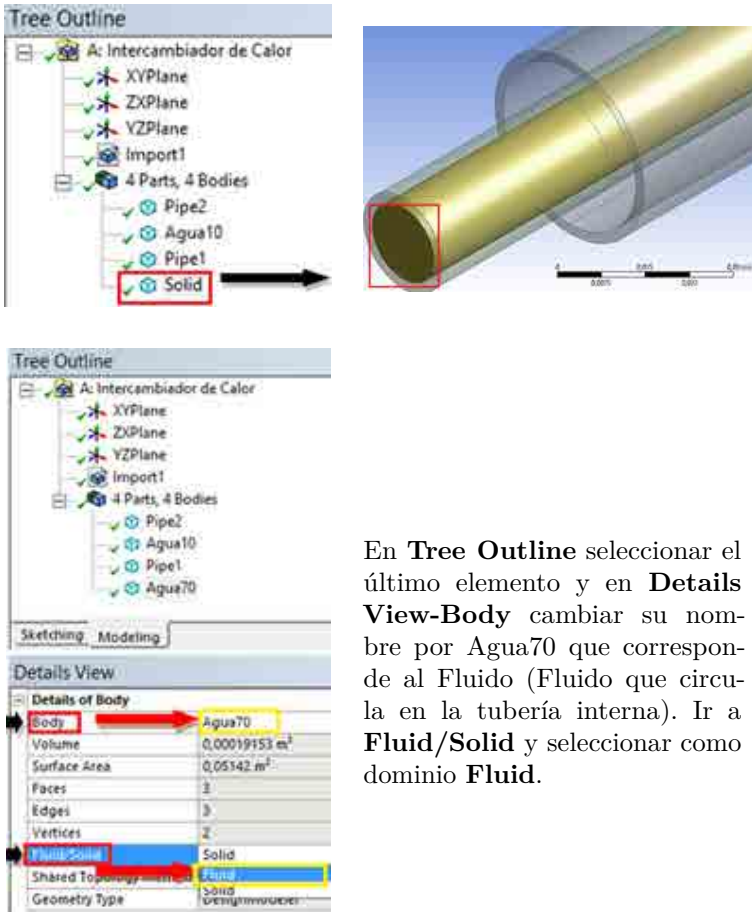


En **Tree Outline** seleccionar el siguiente elemento y en **Details View-Body** cambiar su nombre por **Agua10** (Fluido que circula en la coraza).

A continuación dirigirse a **Fluid/Solid** y seleccionar como dominio **Fluid**.



En **Tree Outline** seleccionar el tercer elemento y en **Details View-Body** cambiar su nombre por **Pipe1**. Esta geometría es la tubería interna (tubo del intercambiador). En **Fluid/Solid** seleccionar como dominio **Solid**.



En **Tree Outline** seleccionar el último elemento y en **Details View-Body** cambiar su nombre por Agua70 que corresponde al Fluido (Fluido que circula en la tubería interna). Ir a **Fluid/Solid** y seleccionar como dominio **Fluid**.

Figura 3.84

10. A continuación, asignar nombres a las regiones en las que se aplican las condiciones de borde: la entrada de agua caliente a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la entrada de agua fría a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para esto dirigirse a la parte superior del **DesigModeler** y escoger en **Selection Filter: Faces**, esto permite seleccionar una cara del modelo (figura 3.85).

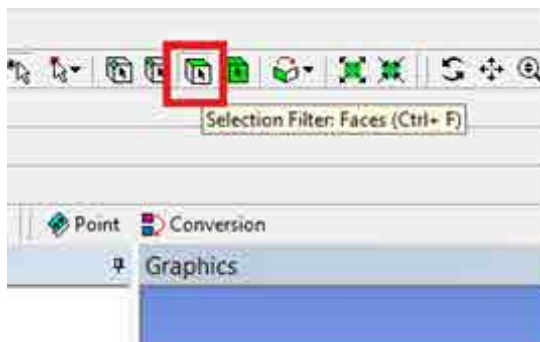


Figura 3.85

11. Con esta herramienta seleccionar la cara (figura 3.86) y luego con click derecho en **Graphics** ir a la opción **Named Selection** (figura 3.87). Como resultado se abrirá un cuadro llamado **Details View** en el cual poner **Inlet Agua70** en **Named Selection** (figura 3.88).

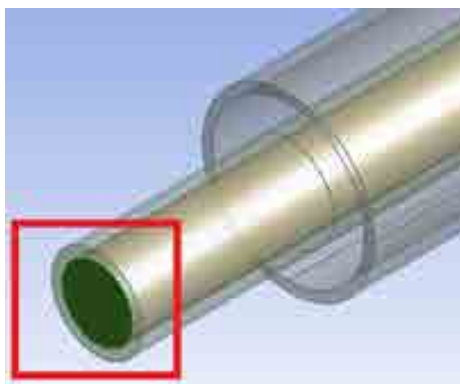


Figura 3.86

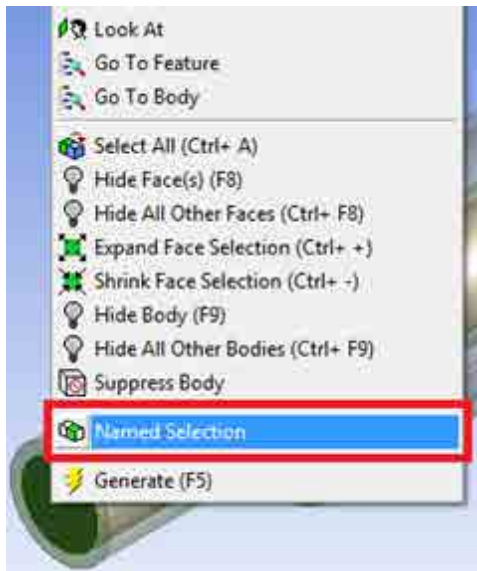


Figura 3.87

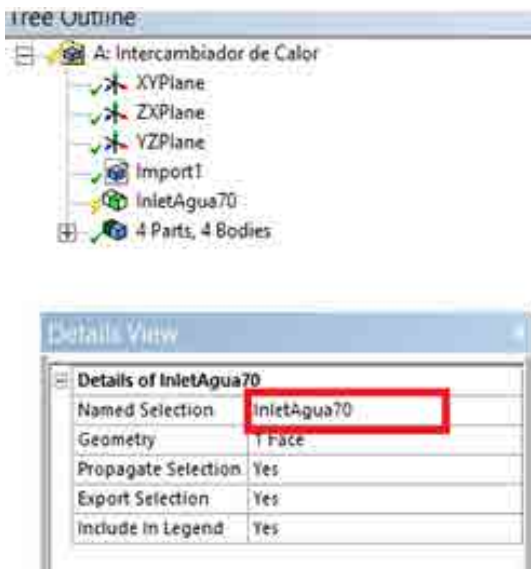


Figura 3.88

12. Una vez puesto el nombre le damos en **Generate** para que se aplique el cambio (figura 3.89).

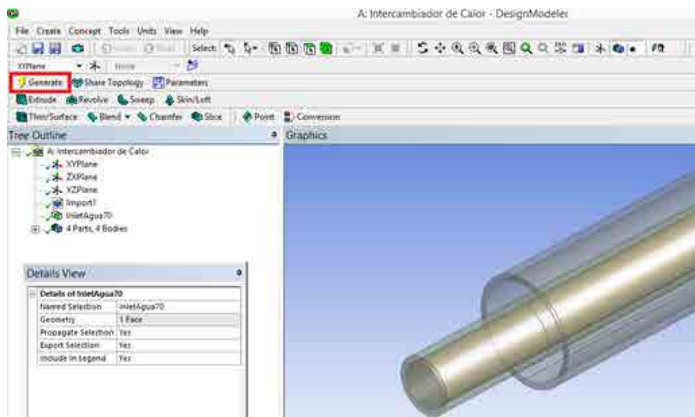


Figura 3.89

13. Luego realizar el mismo procedimiento para la entrada de agua fría donde se le designará el nombre de **Inlet Agua10** (figuras 3.90 – 3.93).

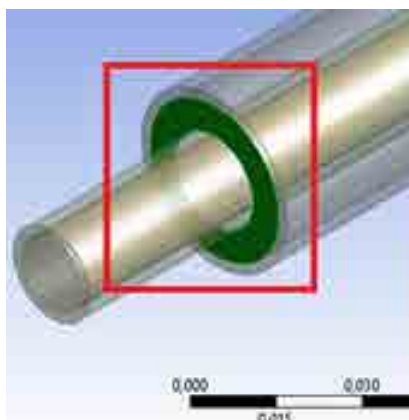


Figura 3.90

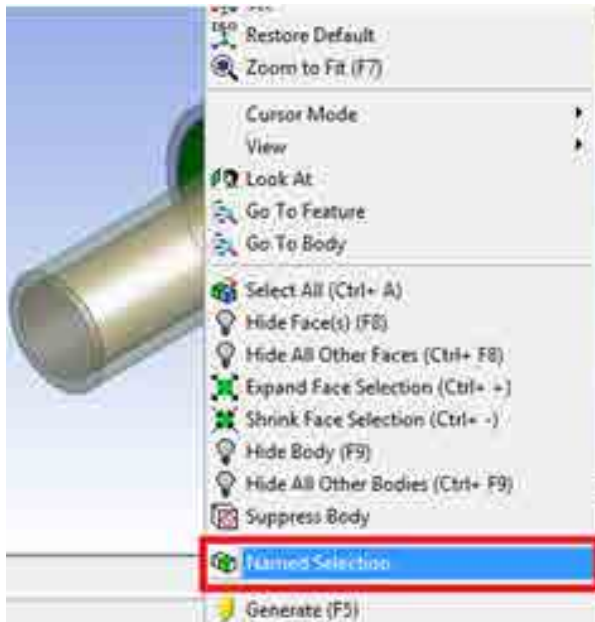


Figura 3.91

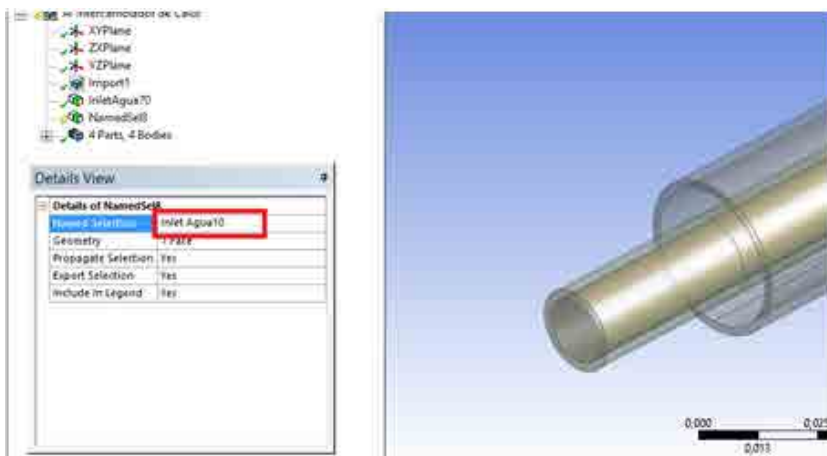


Figura 3.92

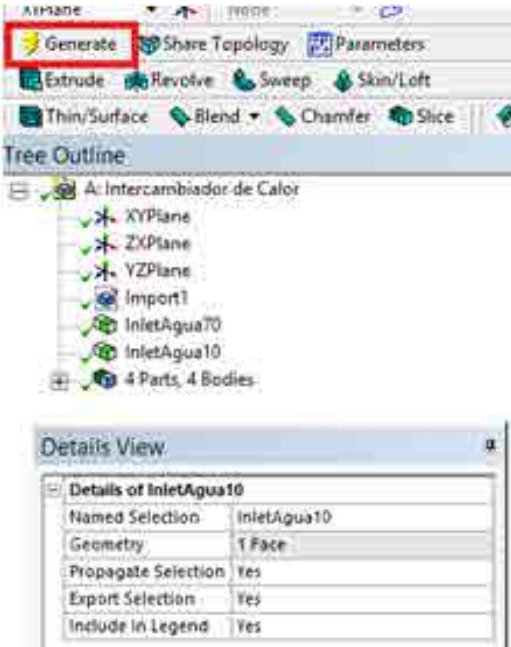


Figura 3.93

14. A la salida de agua caliente asignar el nombre **Outlet Agua70** (figuras 3.94 – 3.97).

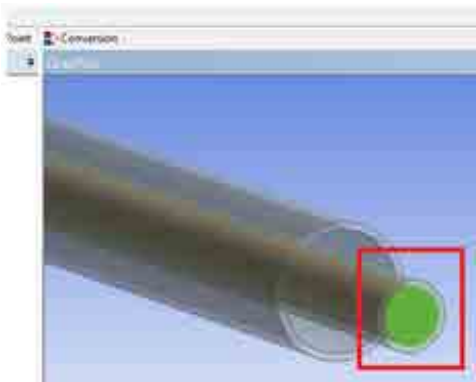


Figura 3.94

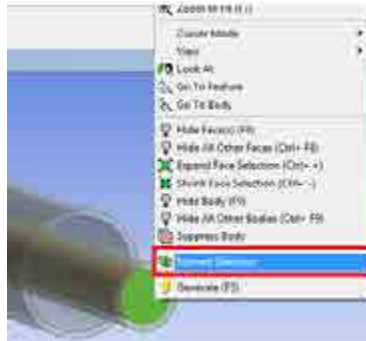


Figura 3.95

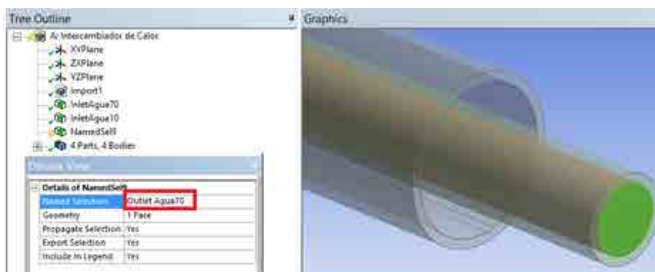


Figura 3.96

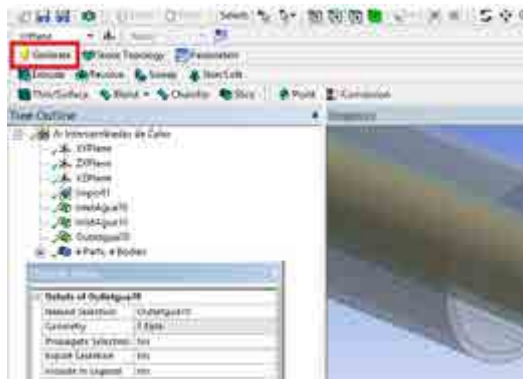


Figura 3.97

15. A la salida de agua fría asignar el nombre **Outlet Agua10** (figuras 3.98-3.101).



Figura 3.98

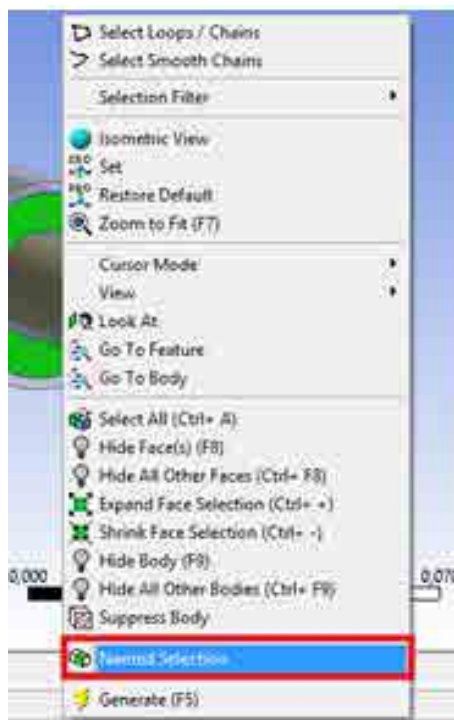


Figura 3.99

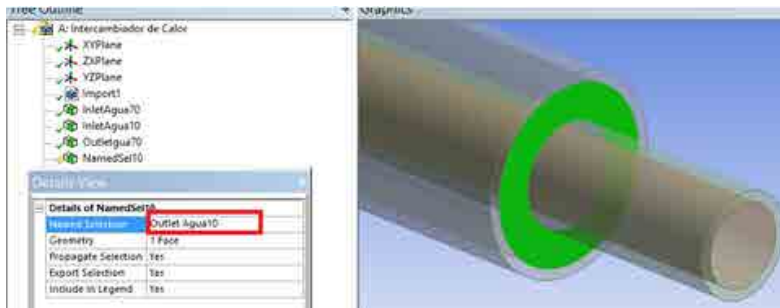


Figura 3.100

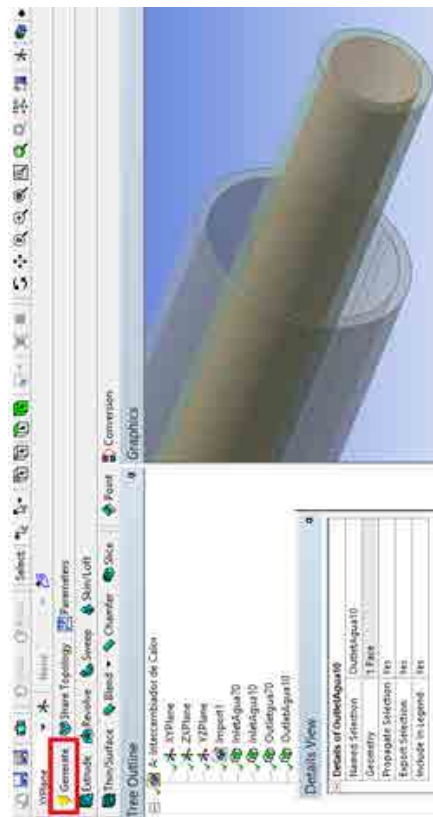


Figura 3.101

16. Al terminar el procedimiento anterior tenemos nombradas las regiones de entrada, salida y dominios (figura 3.102).

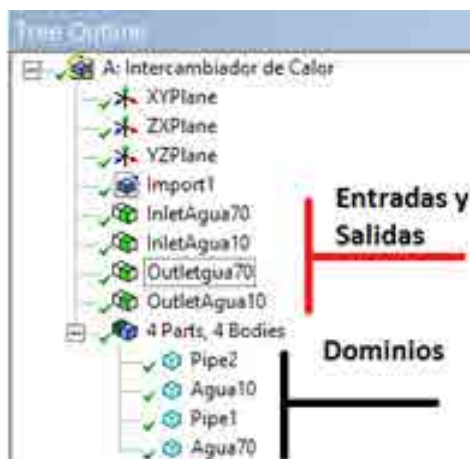


Figura 3.102

17. Cerrar la interfaz **Geometry**.
18. Para abrir la interfaz del Meshing, hacer doble click en Mesh (figura 3.103)



Figura 3.103

19. Una vez en la interfaz del meshing realizar cambios en el **Mesh-Details of "Mesh"**. En **Defaults-Relevance** poner 100. En **Sizing-Relevance Center** seleccionar Fine (figura 3.104).

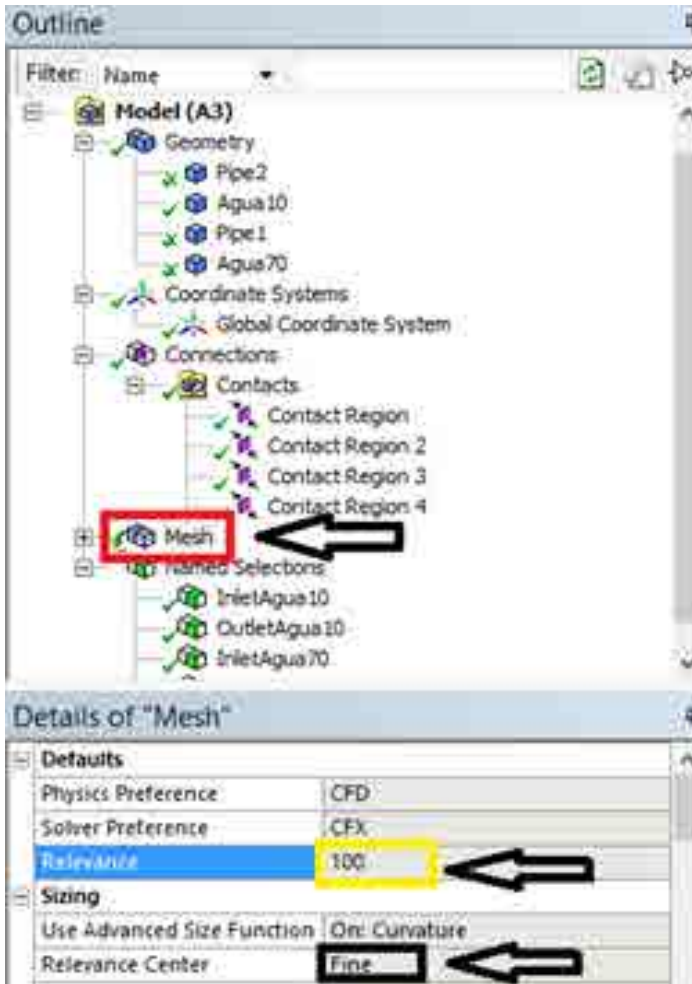


Figura 3.104

20. Para cambiar el tipo de mallado ir al **Mesh-Insert-Method** (figura 3.105).

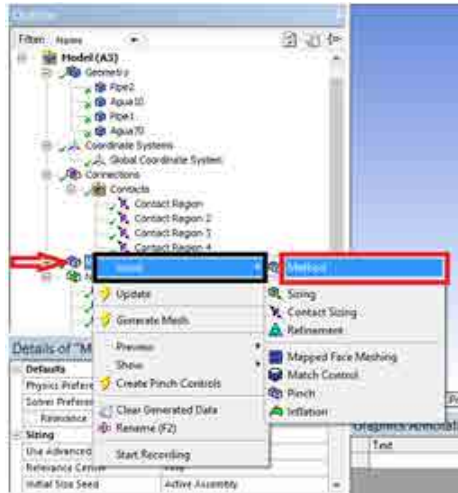


Figura 3.105

21. En la ventana **Details** dar click en **No Selection** (figura 3.106).

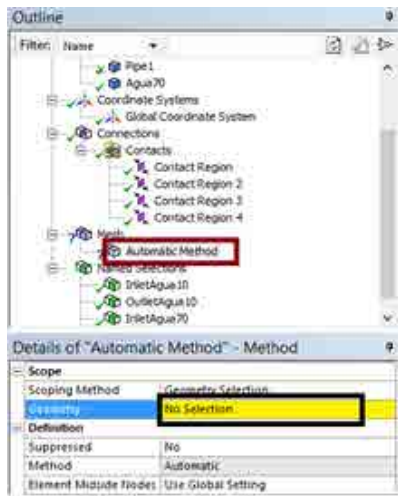


Figura 3.106

22. Ir a la opción de selección de cuerpos (cubo verde) en la barra de herramientas, y seleccionar el dominio que está denominado como **Agua70** y dar click en **Apply** (figura 3.107).

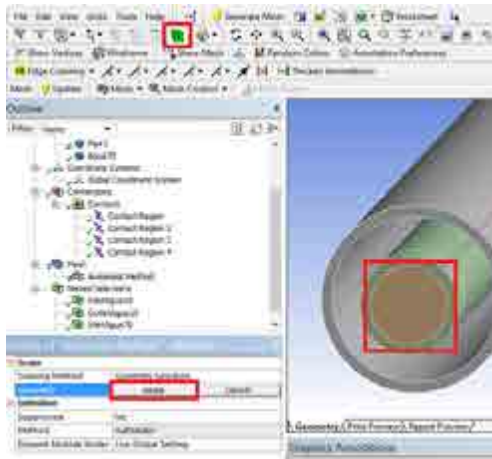


Figura 3.107

23. En la ventana **Details** ir a la opción **Method-Tetrahedrons** (figura 3.108).

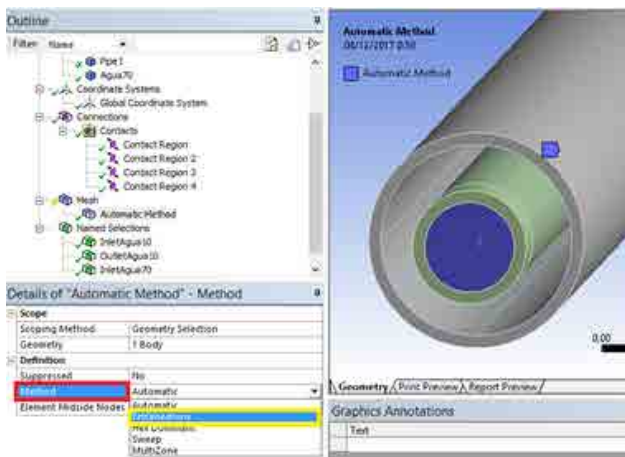


Figura 3.108

24. Para modificar el tamaño de elementos Tetrahedricos ir a **Algorithm-Patch Independent** (figura 3.109), luego **Advanced-Max Element Size** y poner 1 mm (figura 3.110).

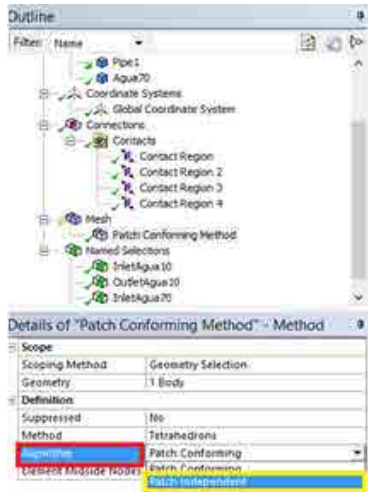


Figura 3.109



Figura 3.110

25. Dar click en **Generate** y el programa comenzará a mallar. Esto tomará varios minutos ya que es una malla muy fina (figura 3.111).

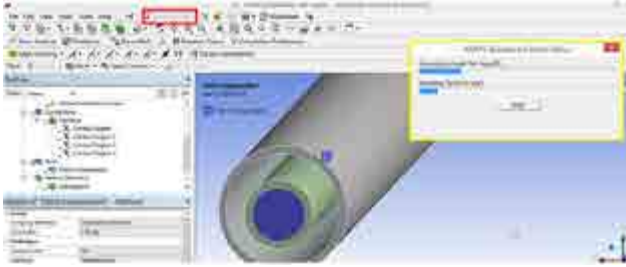


Figura 3.111

26. Este procedimiento repetir para los 4 dominios (figuras 3.112 – 3.113).

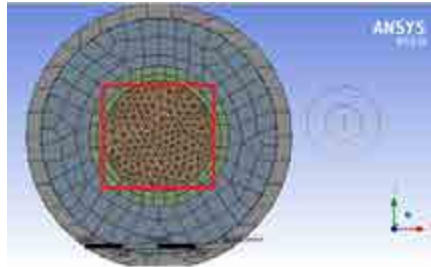


Figura 3.112

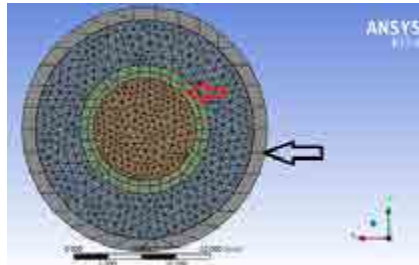


Figura 3.113

27. Hacer doble click en Setup, para abrir la interfaz del **CFX-Pre** (figura 3.114).



Figura 3.114

28. Para identificar fácilmente los dominios se puede cambiar sus nombres (Figura 160). Para esto cambiar el nombre de B16 a **Pipe2** (figura 3.115 – 3.117).

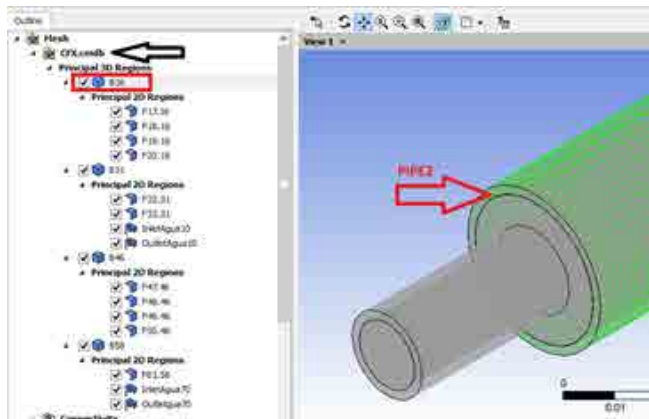


Figura 3.115

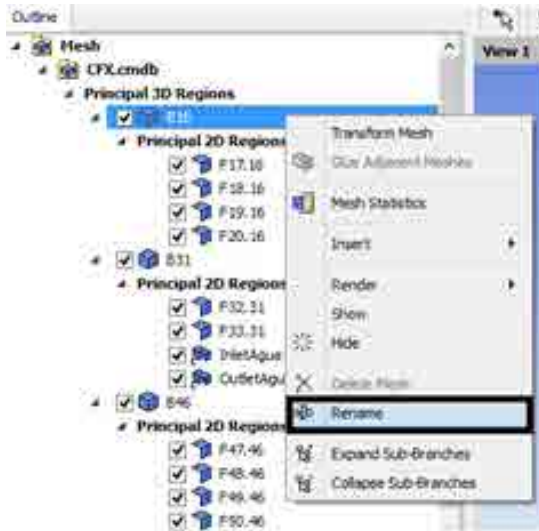


Figura 3.116

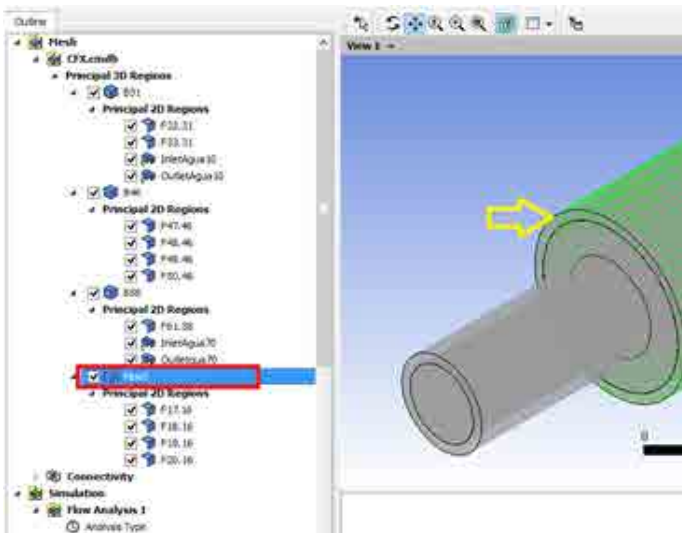


Figura 3.117

29. Ahora realizar el mismo procedimiento para los demás dominios (tabla 3.7) y (figura 3.118).

Default	Cambio de nombre
B31	Agua10
B46	Pipe1
B58	Agua70

Tabla 3.7

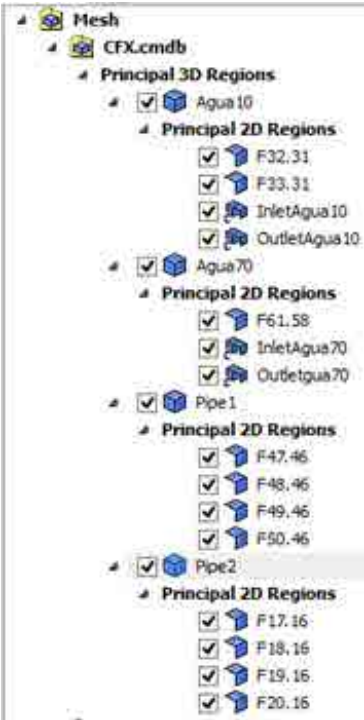


Figura 3.118

30. Para configurar el dominio, **Pipe2**, ir a **Default Domain** y hacer click derecho, **edit** (figura 3.119).

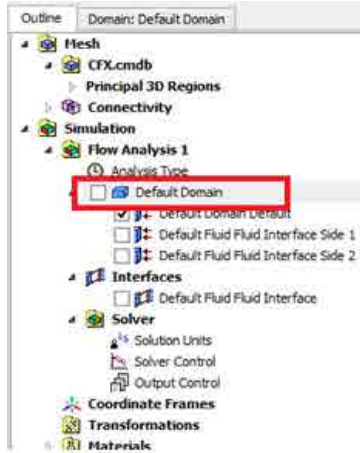


Figura 3.119

31. Luego seleccionar en **Location-Selection Dialog-Pipe2** y **Ok** (figura 3.120).

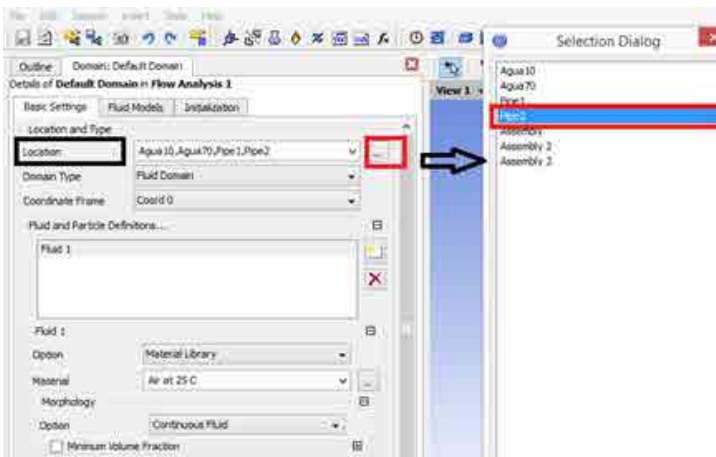


Figura 3.120

32. Ahora definir el tipo de dominio para **Pipe2** seleccionando en **Domain Type-Solid Domain** (figura 3.121).

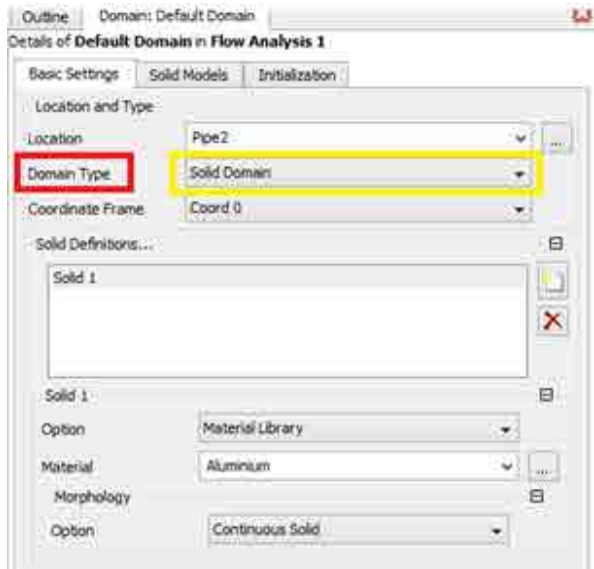


Figura 3.121

33. Luego modificar las propiedades del material **Steel** por las de acero inoxidable 304, según la tabla 3.8.

Propiedades del acero inoxidable 304
Densidad = 8100 kg/m^3 Calor específico = 515 J/kg K Conductividad Térmica = 15.1 W/m K Masa molar = 60 kg/kmol

Tabla 3.8. Propiedades del acero inoxidable 304. [9]

34. En **Materials-Steel** hacer click derecho y seleccionar Edit (figura 3.122).



Figura 3.122

35. En **Details of Steel-Material Properties** realizar las configuraciones (figura 3.123) ingresando los datos de la tabla 3.8 y dar click en **Apply-OK** (figura 3.124).



Figura 3.123



Figura 3.124

36. En la ventana de la figura 3.121 seleccionar el tipo de material para **Pipe2-Steel** (figura 3.125).

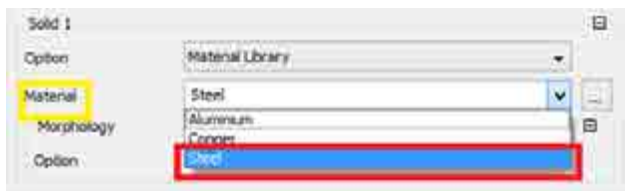


Figura 3.125

37. Una vez cargados los datos del dominio cambiar su nombre por **Pipe2** (figura 3.126).

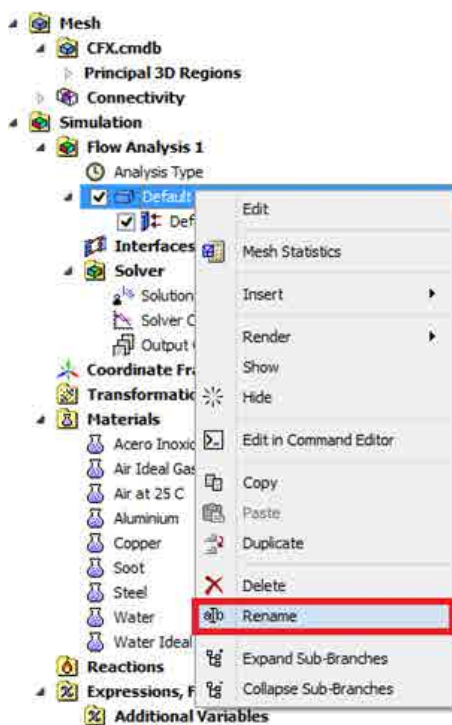


Figura 3.126

38. Crear un nuevo dominio y realizar los mismos pasos anteriores asignándole el nombre de **PIPE1** (figura 3.127).

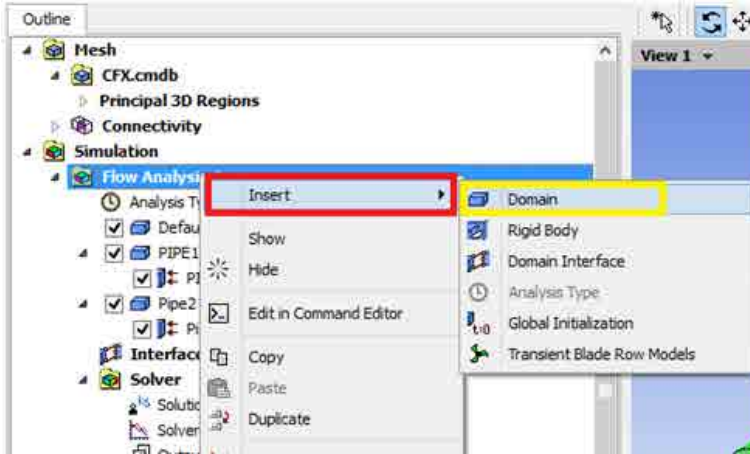


Figura 3.127

39. Crear el dominio **AGUA10**, y seleccionar en **Domain Type** - **Fluid Domain** y en **Material** - **Water** (figura 3.128).

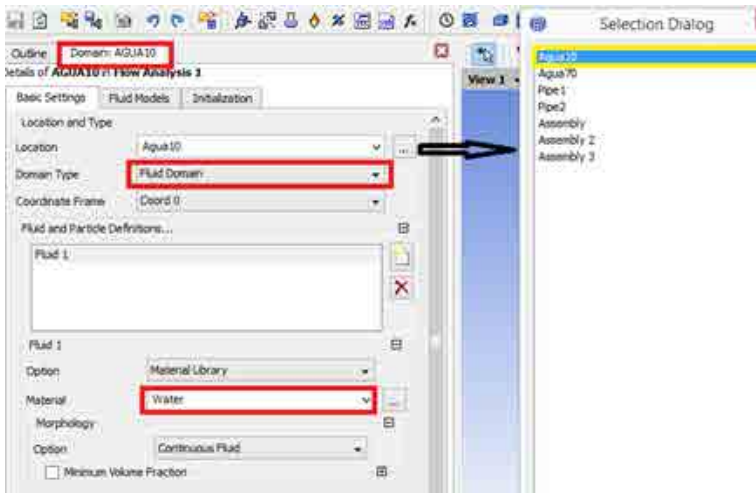


Figura 3.128

40. Realizar el procedimiento anterior para **AGUA70**.
41. Una vez realizado todo ese proceso, la configuración del **Flow Analysis 1** debería quedar como se indica en la figura 3.129.

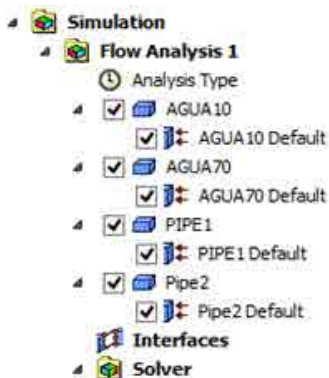


Figura 3.129

42. Crear la interfaz y configurarla dando click derecho en **Domain Interface-Edit** (figura 3.130) y realizar los ajustes según la figura 3.131. Cambiar su nombre por **PIPE2AGUA10** dando click derecho en **Domain Interface-Rename** (figura 3.132).

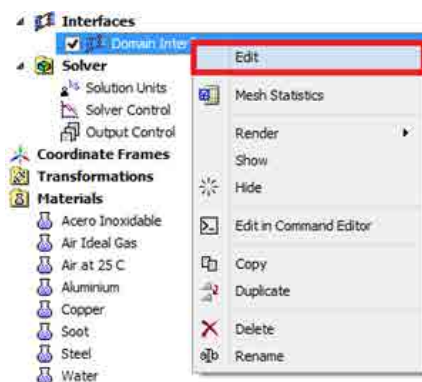


Figura 3.130

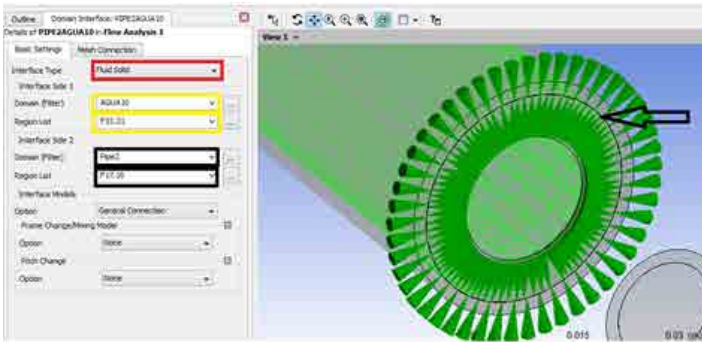


Figura 3.131

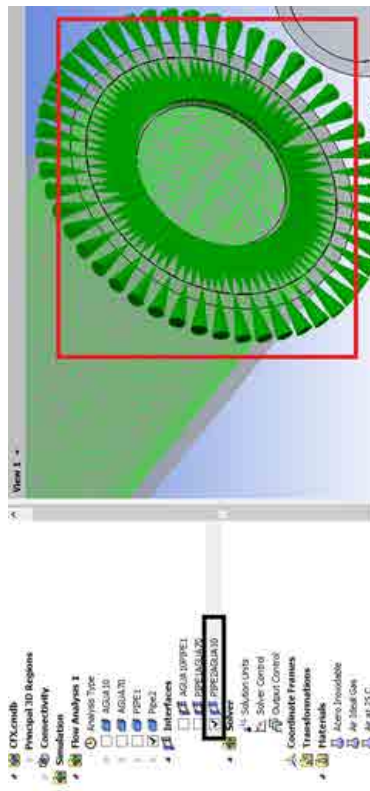


Figura 3.132

43. Realizar el procedimiento anterior para las nuevas interfaces, nombrándolas como **PIPE1AGUA70** y **AGUA10PIPE1**, con las configuraciones respectivas según las figuras 3.133 y 3.134.

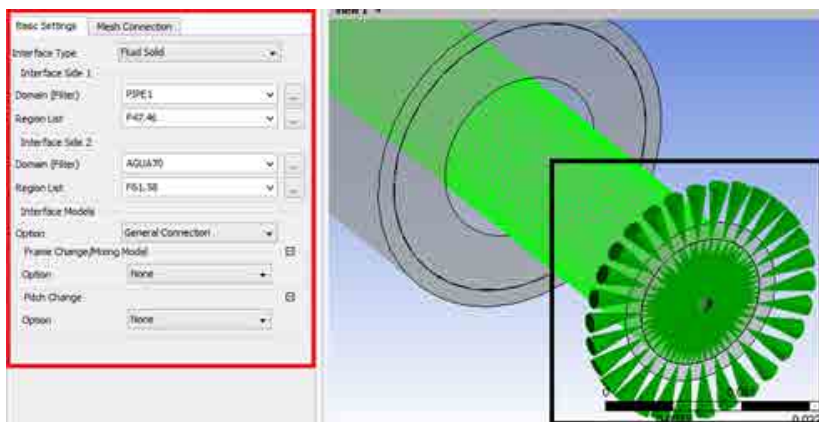


Figura 3.133

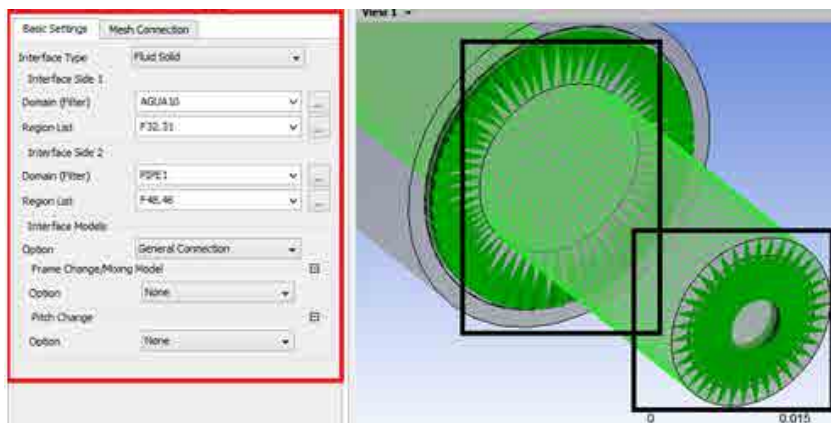


Figura 3.134

44. Ahora seleccionar los modelos para la transferencia de calor dando click derecho en **AGUA10** , luego escoger la opción **Edit-Fluid Models-Heat Transfer-Option-Thermal Energy** (figura 3.135).

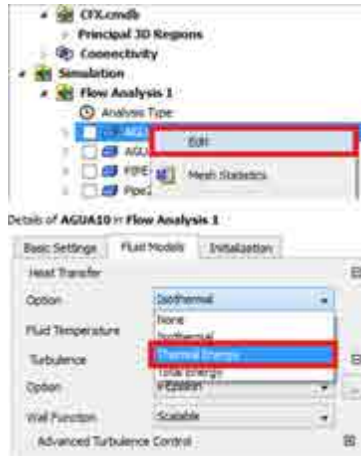


Figura 3.135

45. Realizar el mismo procedimiento con el dominio **AGUA70**.
46. Al seleccionar el modelo Thermal Energy aparecerán los mensajes de error indicados en la Figura 181. Para eliminarlos dar doble click sobre cada uno de ellos y seleccionar **Apply-OK** (figuras 3.136 y 3.137).

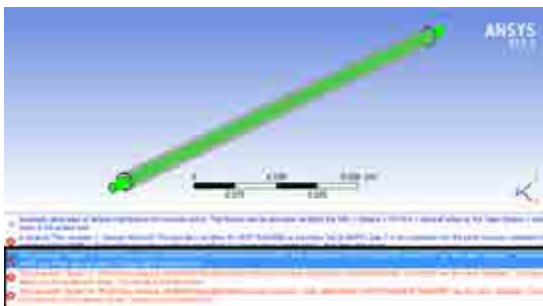


Figura 3.136



Figura 3.137

47. Para especificar las regiones y las condiciones de entrada de agua realizar el siguiente procedimiento: dar click derecho en **AGUA10**, seleccionar **Insert–Boundary** (figura 3.138), a esta frontera asignar el nombre **INLET AGUA 10** (figura 3.139), a continuación aparecera la ventana **Boundary: INLET AGUA 10**, en la pestaña **Basic Settings** en la opción **Boundary Type** seleccionar **Inlet** y en **Location** seleccionar **InletAgua10** (figura 3.140), en la pestaña **Boundary Details** realizar las configuraciones indicadas en la figura 3.141 y para terminar dar click en **Apply–OK** (figura 3.142).

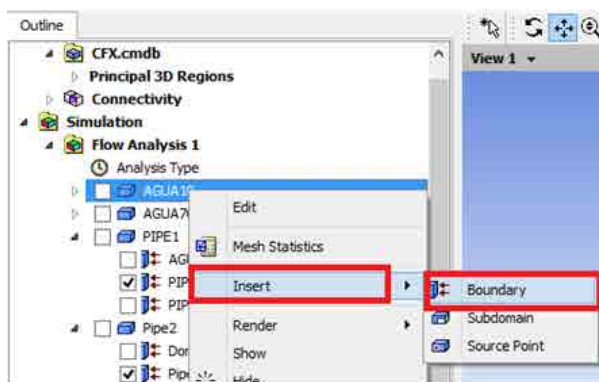


Figura 3.138



Figura 3.139

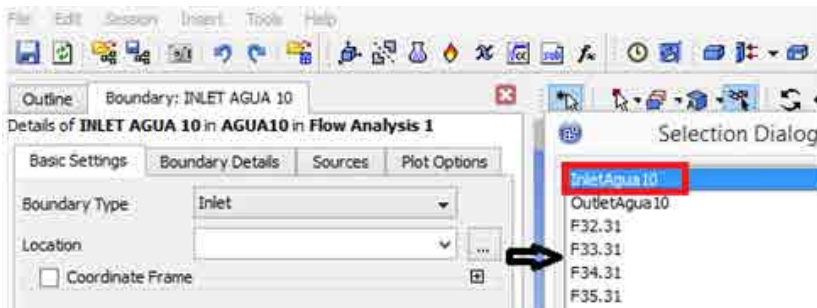


Figura 3.140

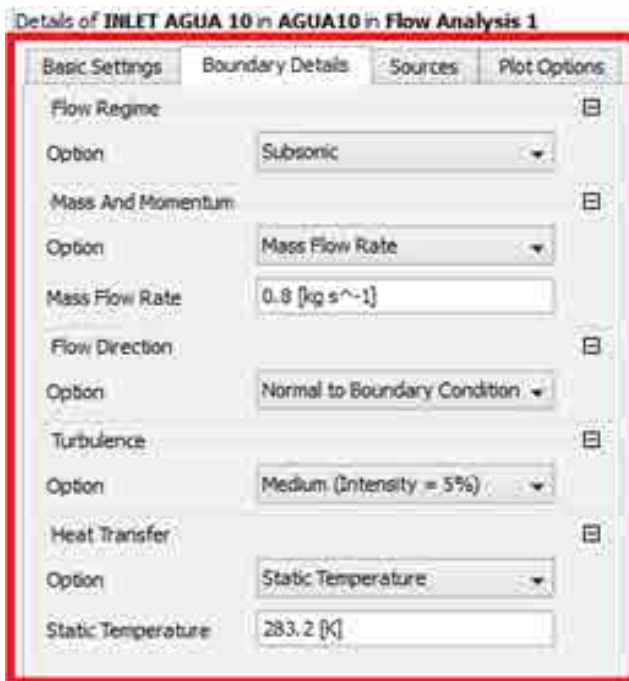


Figura 3.141

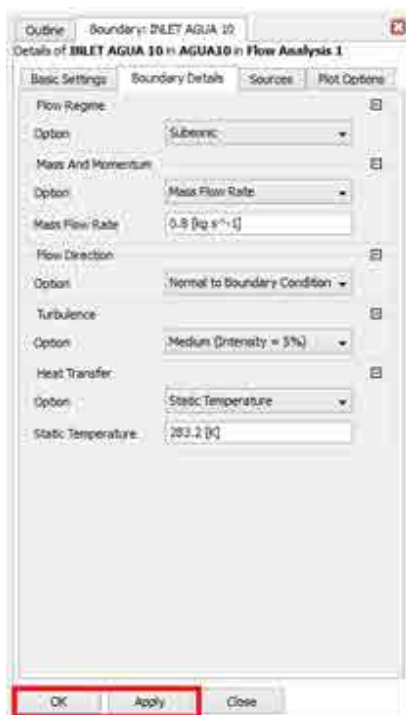


Figura 3.142

48. Realizar el procedimiento especificado anteriormente para el dominio **AGUA70** con las configuraciones indicadas en las figuras 3.143 – 3.147.

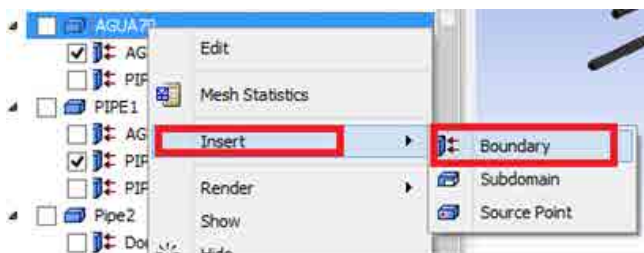


Figura 3.143

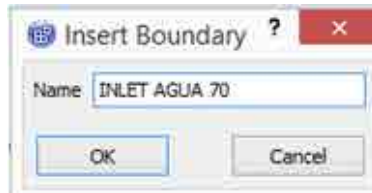


Figura 3.144

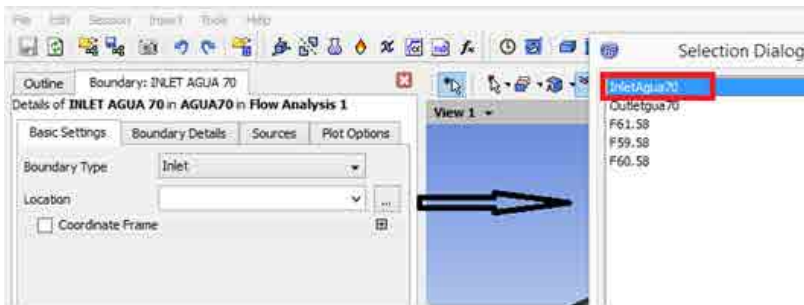


Figura 3.145

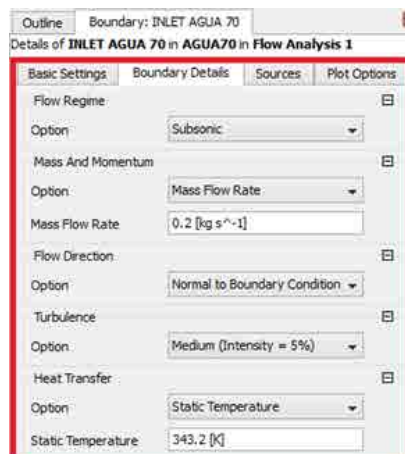


Figura 3.146

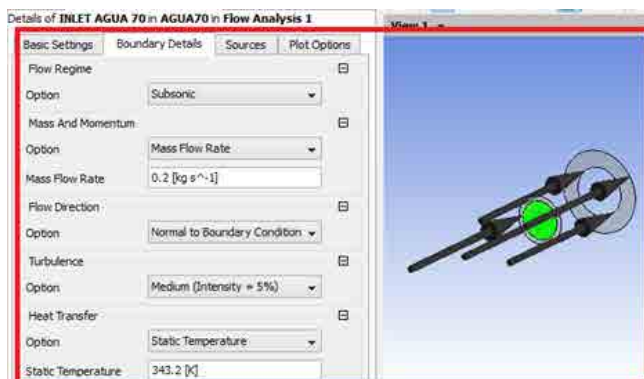


Figura 3.147

49. Para especificar las regiones y las condiciones de salida de agua realizar el siguiente procedimiento: dar click derecho en **AGUA10**, seleccionar **Insert – Boundary** (figura 3.148), a esta frontera asignar el nombre **OUTLET AGUA 10** (figura 3.149), a continuación aparecerá la ventana **Boundary: OUTLET AGUA 10**, en la pestaña **Basic Settings** en la opción **Boundary Type** seleccionar **Outlet** y en **Location** seleccionar **OutletAgua10** (figura 3.150), en la pestaña **Boundary Details** realizar las configuraciones indicadas en la figura 3.151 y para terminar dar click en **Apply–OK**.

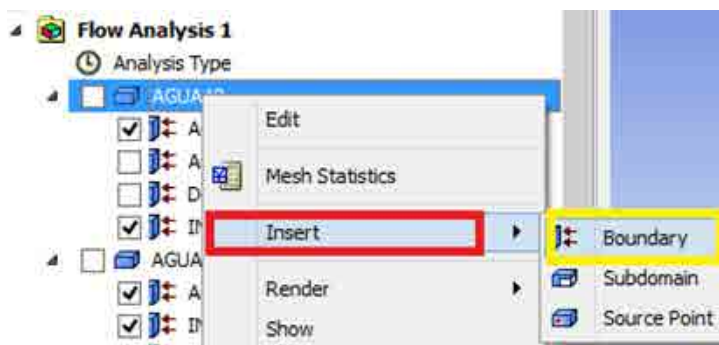


Figura 3.148

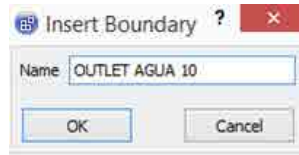


Figura 3.149

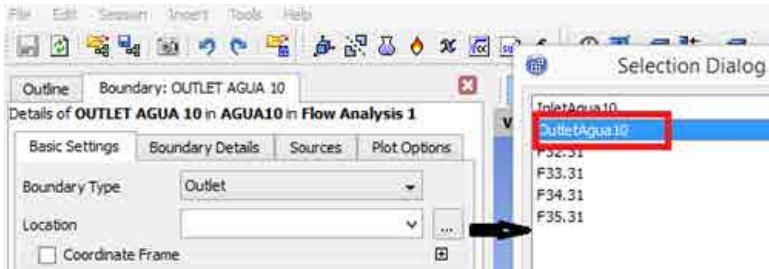


Figura 3.150

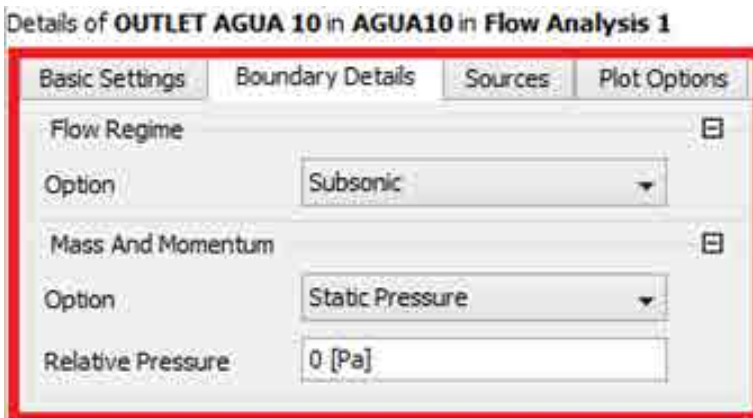


Figura 3.151

50. Realizar el procedimiento especificado anteriormente para el dominio **AGUA70**.

51. Ir al **Solver Control** y en la opción **Max.Iterations** ingresar **250** (figura 3.152).

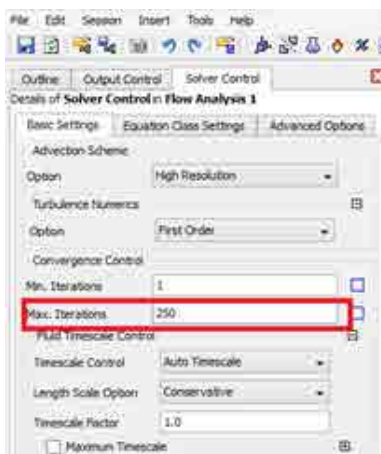


Figura 3.152

52. En la opción **Output Control** realizar las configuraciones según la figura 3.153.

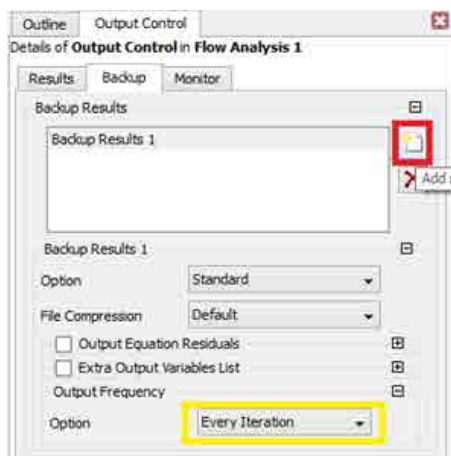


Figura 3.153

3.1.11. Resultados

Para visualizar los resultados realizar el procedimiento indicado en el problema 4 y representarlos como se muestra en la figura 3.154.

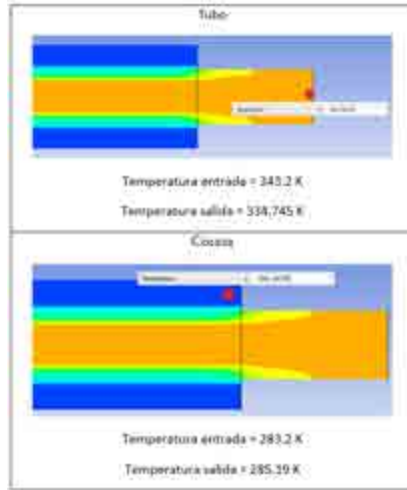


Figura 3.154. Resultados de ANSYS.

Para comparar los resultados de la simulación en **Ansys Workbench CFX** con los de **SolidWorks Flow Simulation** y cálculo analítico [9], representados en la Tabla 18 se usan las fórmulas para la efectividad del intercambiador de calor.

La efectividad para el flujo en paralelo para el intercambiador de tubo y coraza se puede calcular de la siguiente manera [1]:

$$\varepsilon_{parallel-flow} = \frac{1 - e^{-NTU(1+c)}}{1 + c}$$

donde:

- ε efectividad del flujo paralelo
- NTU** el número de unidades de transferencia
- c** relación de capacidad

$$\varepsilon = \frac{T_{max,in} - T_{max,out}}{T_{max,in} - T_{min,in}}$$

donde:

$T_{max,in}$	temperatura máxima de entrada
$T_{max,out}$	temperatura máxima de salida
$T_{min,in}$	temperatura mínima de entrada
$T_{max,in}$	temperatura mínima de salida

Usando los resultados de **SolidWorks Flow Simulation** la efectividad es:

$$\varepsilon = \frac{T_{t,in} - T_{t,out}}{T_{t,in} - T_{s,in}}$$

donde:

$T_{t,in}$	temperatura de entrada en el tubo
$T_{t,out}$	temperatura de salida en el tubo
$T_{s,in}$	temperatura de entrada en la coraza

$$\varepsilon = \frac{343,2K - 335,852K}{343,2K - 283,2K}$$

Usando los resultados del **Asys Worbench CFX** la efectividad es:

$$\varepsilon = \frac{T_{t,in} - T_{t,out}}{T_{t,in} - T_{s,in}}$$

$$\varepsilon = \frac{343,2K - 334,745K}{343,2K - 283,2K} = 0,1409$$

A continuación se presenta una tabla comparativa de los resultados encontrados:

NTU analítico	SolidWork Simulation	Ansys Worbench
Temp de entrada en el tubo = 343.2 K	Temp de entrada en el tubo = 343.2 K	Temp de entrada en el tubo = 343.2 K
Temp de salida en el tubo = 335.8 K	Temp de salida en el tubo = 335.8 K	Temp de salida en el tubo = 334.745 K
	Temp de entrada en la coraza = 283.2 K	Temp de entrada en la coraza = 283.2 K
	Temp de salida en el coraza = 285.25 K	Temp de salida en el coraza = 285.19 K

Tabla 3.9. Comparacion de resultados de temperturas y efectividad.

Referencias

- [1] Cengel, Yunus, Transferencia de calor y de masa, un enfoque práctico, Tercera edición, Editorial McGraw-Hill, México, 2007.
- [2] Incropera, Frank, Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta edición, Editorial Prentice Hall, 1999.
- [3] Chen, Xiaolin, Finite Element Modeling and Simulation with Ansys Workbench, Taylor & Francis Group, 2015.
- [4] Buriaka V.A. Inzhenerniy analiz v Ansys Workbench, Samarskiy tekhnicheskii universitet, 2010.
- [5] [https://es.scribd.com/document/18160415/eBook - Transfer en-CIA-de-Calor-Omar-Gelvez-Acidraker](https://es.scribd.com/document/18160415/eBook-Transfer-en-CIA-de-Calor-Omar-Gelvez-Acidraker)
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Ashrae Handbook: Fundamentals. Ashrae Editions, 2013.
- [7] Cengel, Yunus A., Boles, Michael A., Termodinámica, Sexta edición, McGraw - Hill, México, 2008.
- [8] Documentación de Ansys.
- [9] Matsson J. An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2014, SDC Publications, USA, 2014
- [10] Torres Jara, Paul Bolívar. Estudio de mecánica de fluidos y transferencia de calor en alimentos esféricos bajo estructura para protección de lluvias; tutor Dr. Nelson Moraga Benavides. Santiago-Chile, 2009.
- [11] Aguirre Rivera, Juan José. Análisis computacional-experimental del comportamiento térmico de un furgón frigorífico, construido por la empresa "Carrocerías Faicán", para el transporte de alimentos / Juan José Aguirre Rivera, Carlos Esteban Buenaño Merino ; tutor Paúl Bolívar Torres Jara. Cuenca [Ecuador], 2018. (000138851)